



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

ANTTI SUNELL

**OSASTOIVAN ALUMIINISEN PALO-OVIJÄRJESTELMÄN
TIIVEYDEN JA ERISTÄVYYDEN KEHITYSTYÖ**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Timo Kalema
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone- ja materiaalitekniikan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
9. toukokuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

SUNELL, ANTTI: Osastoivan alumiinisen palo-ovijärjestelmän tiiveyden ja eristävyyden kehitystyö

Diplomityö, 95 sivua, 1 liitesivu

Heinäkuu 2012

Pääaine: Konstruktitekniikka

Tarkastaja: professori Timo Kalema

Avainsanat: Palo-ovi, palonsuojaus, polttotestaus, rakennusjärjestelmä, tyyppi-hyväksyntä, CE-merkintä

Keväällä 2012 astui voimaan asetus, jonka mukaan osastoivien järjestelmien paloluokituksessa ei saa enää käyttää kansallisia luokitusmenetelmiä. Työn tarkoituksena oli kehittää Purso Oy:n valmistamaa osastoivaa alumiinista palo-ovijärjestelmää vastaamaan EN-standardien mukaisia paloluokitusvaatimuksia, jotta niille voitaisiin hakea uudet tyyppihyväksynnot. Kyseisen P80-sarjan ovikokoonpanot ovat tällä hetkellä tyyppihyväksytty vanhojen kansallisten vaatimusten mukaan, jotka ovat hieman kevyemmät kuin EN-standardeissa vaaditut rajat ja ehdot.

CE-merkinnän kannalta EN-standardien mukainen paloluokitus järjestelmälle on tärkeää, sillä CE-merkintä perustuu EN-standardeissa annettuihin vaatimuksiin. CE-merkintä tulee rakennustuotteille pakolliseksi vuoden 2013 heinäkuussa, mutta osastoiville järjestelmille CE-merkintä ei kuitenkaan vielä tällöin ole mahdollista, sillä niiden harmonisoitua tuotestandardia ei ole vielä julkaistu. Työssä halutaan kuitenkin jo valmistautua CE-merkintää varten, joka tulee olemaan väistämätöntä tulevaisuudessa.

Työssä käsiteltävän järjestelmän paloteknisten ominaisuuksien kehittämiseksi tuli ensin kartoittaa tapoja, joilla palonsuojausta voitaisiin parantaa. Suurin huomio tiedonhaussa kohdistettiin profiilien sisään laitettavien täyteaineiden etsintään. Tiedonhaun jälkeen tehtiin lämmönsiirtotarkasteluita sellaisille asioille, joille se oli mahdollista. Palotapahtuman mallinnuksen ja laskennan vaikeuden takia jouduttiin lämmönsiirtotarkastelut tekemään varsin rajatussa muodossa ja yksinkertaisille rakenteille.

Tärkeimmät tarkastelut työssä tehtiin käytännön avulla, jota varten rakennettiin pieni polttotestausuuni elementtien testausta varten. Polttouuni rakennettiin vastaamaan mahdollisimman hyvin sekä standardeissa asetettuja polttouunin vaatimuksia että viranomaisten asettamia turvallisuusehtoja. Tavoitteena oli saada muodostettua vertailukelpoista tietoa, jonka avulla pystyttäisiin analysoimaan eri ratkaisuvaihtoehtojen toimivuutta.

Työn tuloksena saatiin valmistettua hyvin toimiva ja tarkoituksenmukainen polttouuni. Polttouunilla tehtyjen testien perusteella pystyttiin valitsemaan vaihtoehtojen joukosta sellainen ratkaisu, joka paloteknisiltä kyvyiltään oli riittävä, ja joka kaupallisessa mielessä soveltuu hyvin järjestelmän ratkaisuksi. Valitun ratkaisun avulla suoritettiin täysikokoisen elementin polttotestaus, joka täytti kaikki sille asetetut vaatimukset mallikkaasti.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

SUNELL, ANTTI: The development of integration and insulation of an aluminium fire door building system

Master of Science Thesis, 95 pages, 1 Appendix page

July 2012

Major: Mechanics and Design

Examiner: Professor Timo Kalema

Keywords: Fire door, fire resistance, fire testing, building system, type approval, CE-marking

Fire classification of separating building systems must be done by EN-standards according to an act that came into force in the spring of 2012. The fire classification cannot be done anymore by national requirements which were little bit lighter than in EN-standards. The objective in this thesis is to develop a fire door system manufactured by Purso Oy with the result that the system may be granted a type approval by EN-standards. The fire door configurations of the system have a type approval by the old national requirements at the moment. The system needs to be improved to a level that it is able to correspond the fire classification requirements manifested within the EN-standards.

Fire classification by EN-standards is an essential part of CE-marking because CE-marking is based on the requirements declared within EN-standards. CE-marking is mandatory in all construction products since July 2013, although it is not possible to CE-mark separating building systems when the time comes for the reason that there will not yet be a harmonized product standard available at that moment. Preparation for the CE-marking wanted to be included to this thesis because CE-marking will be inevitable in the future.

The first operation in the thesis was to chart possible solutions which can be used to enhance the fire resisting abilities of the system. The main focus was to find suitable filling materials for the profiles. After the search of information some heat transfer calculation was to be done. Models and heat transfer calculations had to be kept simple because of the difficulty in modeling the fire event.

The most important examination was done by practical research for which purpose a small burning furnace was build. The furnace was prepared to correspond for the requirements of burning furnace within the standards and also to fulfill all safety regulations given by the national authorities. The objective was to gather comparable data from the tests which allow accurate analysis for the different solutions.

A well-functioning and an appropriate burning furnace were completed as a result of this thesis. Also the best solution for the system was found on the basis of practical tests. The solution was sufficient from its fire technical properties and good choice in commercial point of view. A full-size element that was made according to the selected solution was able to withstand all the set requirements well.

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston Konstruktitekniikan laitokselle Purso Oy:n toimeksiannosta. Työn ohjaajina toimivat professori Timo Kalema Tampereen teknilliseltä yliopistolta sekä tuotekehityspäällikkö Vesa Knuutila Purso Oy:stä. Työhön liittyneet tehtävät ja käytännön toimet toteutettiin pääasiassa Purso Oy:n tiloissa Vesa Knuutilan ohjaamana alkuvuoden 2012 aikana. Opinnäytetyön kirjoitusvaihe taas ohjautui Timo Kaleman antamien opastuksien avulla lopulliseen muotoonsa.

Erityisesti haluaisin kiittää Vesa Knuutilaa pyyteettömästä avunannosta ja ohjeistuksesta, mielenkiintoisista keskusteluista työn tiimoilta sekä hyvästä tuesta työn ongelmien ratkaisun parissa. Timo Kalemaa tahdon kiittää opinnäytetyön kirjallisen osion valmistumisesta ja etenkin loppuvaiheiden hienosti onnistuneesta yhteistyöstä. Purso Oy:stä haluan esittää kiitoksen myös tuotekehityspäällikkö Simo Järvisalolle, suunnitteluinsinööri Hannu Mannilalle sekä protopajamestari Veikko Maggalle. Ilman teidän panostanne ja erinomaisia neuvoja opinnäytetyön käytännönsuudessa olisi työn tulosten saaminen ollut paljon haasteellisempaa ja mahdollisesti vienyt huomattavasti enemmän aikaa. Kiitos myös Purson rakennusjärjestelmäyksikön henkilökunnalle sekä koko Siuronmäen väelle.

Tampereella 31.7.2012

Antti Sunell

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Työn taustaa	2
2.1	Osastoivat rakenteet	4
2.2	Osastoivilta rakenteilta vaaditut ominaisuudet	6
2.3	Rakenteiden polttotestaus	9
2.3.1	Testauslaitteisto	9
2.3.2	Testattavan elementin esivalmistelut	13
2.3.3	Polttotestauksen suoritus ja testiraportti	15
2.3.4	Testien suunnittelu ja testiraporttien soveltaminen	20
2.3.5	Testiraporttien suorat sovellusmahdollisuudet	21
2.3.6	Testiraporttien laajennetut sovellusmahdollisuudet	23
2.4	Purson osastoivat rakennusjärjestelmät	28
2.4.1	Palorakenteiden profiilit ja profiilien muotoilu	29
2.4.2	Rakenteissa käytettävät lisämateriaalit ja tukimekanismit	33
2.5	Rakennustuotteiden CE-merkintä	36
2.6	Lämmönsiirrosta	40
3	Tiedonhaku ja tutkimusmenetelmät	43
3.1	Tiedonhaku	43
3.2	Laskennallinen tutkimus	44
3.3	Polttouunin rakentaminen	46
3.3.1	Vaatimukset ja suorituskky	46
3.3.2	Sijoituspaikka ja runko	47
3.3.3	Polttimet ja turvalaitteet	49
3.3.4	Huuva ja uunin pakoputki	53
3.4	Elementtien testaus ja tiedonkeruu	58
4	Tulokset ja niiden tarkastelu	62
4.1	Tiedonhaun tulokset	62
4.2	Laskennasta saadut tulokset	66
4.3	Elementtien testauksesta saadut tulokset	72
5	Johtopäätökset	79
5.1	Polttouunin toiminta ja soveltuvuus testaukseen	79
5.2	Työn tulosten käsittely ja jatkosovellukset	81
5.3	Tulevaisuuden kehityskohteet	83

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Anodisointi	Alumiinin sähkökemiallinen pintakäsittelymenetelmä, jolla kappaleen pintaan muodostetaan haluttu paksuinen, tiivis ja kestävä oksidikerros.
CE-merkintä	Valmistajan vakuutus tuotteelle asetettujen vaatimusten- ja määräystenmukaisuuden täyttymiselle.
Eristävyys	Polttotestauksen kriteeri, jossa tarkastellaan elementin kylmän puolen pintalämpötiloja niille asetettujen rajojen suhteen.
Ilmoitettu laitos	Kansallisten viranomaisten nimittämä puolueeton laitos, jolla on lupa suorittaa vaatimuksenmukaisuusarviointeja ja -testejä.
Kiinnityskehä	Polttouunin vapaaksi jätetylle sivulle asennettava kehärakenne, johon on kiinnitetty testattava elementti.
Kulkuväli	Avoimen oven tai pariovien muodostama aukko, jonka läpi voidaan kulkea.
Kylmä puoli	Tulen vastakkainen puoli testattavasta elementistä polttotestauksessa.
Kyntetila	Lasin tai umpiosan sekä kehärakenteen väliin jäävä tila.
Osastoiva rakenne	Seinä-, katto- tai lattiarakenne, joka estää vähintään palonkestävyysajan määrittelemän jaksonajan tulipalon leviämisen toiseen rakennukseen tai palo-osastoon.
Palokuorma	Palo-osaston sisällä olevan aineen palaessa täydellisesti vapautuva kokonaislämpömäärä.
Palomuuri	Osastoiva seinärakenne, joka estää palon leviämisen sekä kestää palon aikana siihen kohdistuvia erilaisia iskuja.
Palonkestävyysaika	Aika, jonka pituisen jakson osastoivan rakenteen tulee vähintään kestää sille asetettuja vaatimuksia ja kriteereitä polttotestauksessa.
Palo-osasto	Paloeristetty tila rakennuksessa, joka kestää sille asetetun paloluokituksen edellyttämän ajan.
Palo-ovi	Osa osastoivaa rakennetta, joka muodostaa kulkuaukon kahden palo-osaston välille.
Perimetrinen karmi	Polttotestauselementin ympäryskarmi, joka kiinnitetään polttouunin kiinnityskehään.

Rakennustuoteasetus	Rakennustuotedirektiivin korvaaja, jonka avulla pyritään paremmin saavuttamaan rakennustuotedirektiiville asetetut tavoitteet.
Rakennustuotedirektiivi	Direktiivin tarkoituksena on poistaa kaupan tekniset esteet ja taata rakennustuotteille vapaa liikkuvuus sekä luoda edellytykset valmistajien markkinoille pääsyle Euroopan talousalueella.
Rakentamismääräyskokoelma	Asetus, jonka ohjeilla ja määräyksillä täydennetään maankäyttö- ja rakennuslakia.
Suoritustasoilmoitus	Rakennustuoteasetuksen mukainen ilmoitus, jossa esitetään rakennustuotteen varmennetut ominaisuudet siten, että ne ovat helposti verrattavissa toisiin tuotteisiin ja kansallisiin vaatimuksiin.
Tiiviys	Polttotestauksen kriteeri, jossa tarkastellaan elementtiin mahdollisesti syntyvien rakojen ja aukkojen kokoa sekä niiden kautta rakenteen läpi pääseviä kuumia kaasuja ja liekkejä.
Tyyppihyväksyntä	Tyyppihyväksyntä voidaan myöntää rakennustuotteille, jotka täyttävät niille asetetut vähimmäisvaatimukset ja -määräykset, jotka ovat asetetut rakentamismääräyskokoelmassa.
Umpiosa	Kehärakenteen läpinäkymätön aukko, joka on muodostettu rakennus- ja/tai peltilevyistä.
Uunin puoli	Tulen puoli testattavasta elementistä polttotestauksessa.
Vaatimustenmukaisuusvakuutus	Rakennustuotedirektiivin mukainen todistus rakennustuotteen ominaisuuksista.

MUUTTUJALUETTELO

A_c	$[m^2]$	Kappaleen pinta-ala konvektiossa
A_k	$[m^2]$	Kappaleen johtumissuunnan kohtisuora poikkipinta-ala
A_r	$[m^2]$	Säteilevän pinnan pinta-ala
d_e	$[-]$	Polttouunin lämmityskäyrän alapuolelle jäävän pinta-alan prosentuaalinen poikkeama standardikäyrästä
ε	$[-]$	Säteilevän pinnan emissiviteetti
h_c	$[W/Km^2]$	Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin
k	$[W/Km]$	Väliaineen lämmönjohtavuus
L_k	$[m]$	Johtumissuuntaan mitattu etäisyys
σ	$[W/K^4m^2]$	Stefan-Boltzmanin vakio, $5,67 \cdot 10^{-8} W/K^4m^2$
S	$[Kh]$	Polttouunin todellisen lämmityskäyrän alapuolelle jäävä pinta-ala
S_s	$[Kh]$	Standardin lämmityskäyrän alapuolelle jäävä pinta-ala
t	$[min]$	Polttotestin alusta kulunut aika
T	$[^{\circ}C]$	Polttouunin sisälämpötila
$T_{1,2,s}$	$[^{\circ}C]$	Kappaleen pintalämpötiloja
T_{∞}	$[^{\circ}C]$	Ympäristön lämpötila
q_c	$[W]$	Konvektiossa siirtyvä lämpöteho
q_k	$[W]$	Johtumisessa siirtyvä lämpöteho
q_r	$[W]$	Lämpösäteilemällä kappaleen luovuttama lämpöteho

1 JOHDANTO

Rakennusten paloturvallisuus on ensisijaisen tärkeässä asemassa ennaltaehkäistessä tulipalon leviämistä ja sen vaikutuksia rakennuksissa sekä minimoitaessa henkilö- ja omaisuusvahinkoja tulipalon sattuessa. Tämä opinnäytetyö antaa osviittaa viranomais-ten vaatimuksista sekä lakipykälien sanelemista määräyksistä paloturvalliselle rakennukselle. Työn edetessä kehitellään vanhan palo-ovijärjestelmän pohjalta nykyisten tiukentuneiden lakien ja määräysten mukaisesti suunniteltu osastoiva alumiininen rakennusjärjestelmä.

Opinnäytetyön aihe tuli merkitykselliseksi vuoden 2011 aikana tulleiden lakimuutosten myötä. Uuden asetuksen astuessa voimaan keväällä 2012 päättyneen siirtymäajan jälkeen ei rakennusosien paloluokituksessa saa enää soveltaa kansallisia luokitusmenetelmiä, vaan luokituksessa siirrytään käyttämään pelkästään EN -standardeja. Vaihdos luokitusmenetelmissä aiheuttaa suurimmat muutokset rakennusjärjestelmiltä vaadittavien lämpötilarajojen kohdalla, jotka tiukentuvat ja niiden määritysmenettelmät tarkentuvat entisiin rajoihin verrattuna. Kuitenkin itse testikäytäntö, jolla ehtojen toteutuminen varmennetaan, pysyy lähestulkoon samanlaisena kuin aikaisemmin.

Ensisijaisena tutkimuskohteena opinnäytetyössä on suunnittelu- ja kehitystyö, joka suoritetaan jo aikaisemmin kansallisen tyyppihyväksynnän saaneelle alumiiniselle rakennusjärjestelmälle. Kehitystyön jälkeen tämän rakennusjärjestelmän tulisi täyttää kaikki sille asetetut ehdot sekä paloturvallisessa mielessä että myös kaupallisesta näkökulmasta tarkasteltuna. Tavoitteena työssä ei siis ole ainoastaan luoda viranomaisten tiukentuneita vaatimuksia täyttävää rakennusjärjestelmää, vaan tehdä siitä myös mahdollisimman yksinkertainen sekä toimiva kokonaisuus valmistuksen ja asennuksen kanalta, sekä lisäksi kaupallisessa mielessä kilpailukykyinen ratkaisu osastointien toteuttamiseksi erilaisissa rakennuksissa.

Kehitystyön edetessä pyritään keskittämään erityishuomiota myös lasien kiinnityksessä käytettävien kiinnikkeiden toiminnallisuuden ja moduloitavuuden parantamiseen. Lasinkiinnikkeiden modulaatiolla tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, että käytettävistä lasinpaksuuksista riippumatta voitaisiin lasien kiinnitys alumiiniprofiileihin toteuttaa käyttäen vain yhdenlaista lasinkiinnikettä. Nykyisessä järjestelmässä lähes jokaiselle lasinvahvuudelle löytyy omanlaisensa lasinkiinnike. Lasinkiinnikkeiden toiminnallisuutta kehitettäessä yritetään lasien asennuksessa tarvittavien kiinnikkeiden kokonaismäärää vähentää niiden kestävyyttä parantamalla. Lisäksi lasinkiinnikkeiden uudella muotoilulla pyritään minimoimaan niiden läpi kulkeutuvan lämpövirrantiheyden suuruutta mahdollisimman vähäiseksi.

2 TYÖN TAUSTAA

Rakennuksilla on hyvinkin paljon toisistaan poikkeavia käyttötapoja. Osa rakennuksista on ympärivuorokautisessa käytössä, kun taas osa rakennuksista toimii esimerkiksi tavaroiden pitkäaikaisvarastointia varten. Näin ollen tilojen varsinaiset käyttäjät voivat olla vain hetkellisesti paikalla sen käyttöajasta tai toisessa ääripäässä koko ajan rakennusta asuttamassa. Myös tilojen tuntemuksessa syntyy varsin paljon eroavaisuutta käyttäjien keskuudessa. Toiset käyttäjät osaavat tulipalon sattuessa pelastautua itse, kun taas muille käyttäjille tulee opastaa pelastustiet erikseen tai avustaa muuten heidän pelastautumistaan. Edellä mainittujen asioiden valossa onkin paloturvallisuuden kannalta perusteltua jakaa rakennukset niiden pääkäyttötarkoituksen ja käyttöajan perusteella eri kategorioihin. Jokaisella näistä ryhmistä on hieman toisistaan poikkeavat vaatimukset ja määräykset paloturvallisuuden näkökannalta. Yhteistä kaikille rakennuksille kuitenkin on, että niistä jokaisen tulee täyttää niiden käyttötavan mukainen paloluokitus, jotta niitä jo pelkästään lain puitteissa voitaisiin luvallisesti ja turvallisesti käyttää. [1]

Suomessa rakennusten paloluokitus määritellään Ympäristöministeriön ylläpitämässä rakentamismääräyskokoelman (RakMk) osiossa E1. Rakentamismääräyskokoelma on asetus ja se sisältää määräyksiä ja ohjeita, jotka täydentävät maankäyttö- ja rakennuslakia sekä siihen liittyviä muita asetuksia. Rakentamismääräyskokoelmaa sovelletaan sekä uudis- että korjausrakentamisen yhteydessä ja siinä annetut määräykset ovat kaikkia osapuolia sitovia. Tosin korjaus- ja muutosrakentamisessa kaikkien määräysten ja ohjeiden noudattaminen voi joissakin tilanteissa olla hankalaa, koska kyseisten määräysten ja lakien huomioon ottaminen ei yksinkertaisesti ole ollut mahdollista vanhojen rakennusten suunnittelun yhteydessä. Tästä syystä rakentamismääräyskokoelman sisältöä sovelletaankin korjaus- ja muutosrakentamisessa maankäyttö- ja rakennuslain 13 §:ssä esitetyllä tavalla sekä ympäristöministeriön julkaiseman oppaan ”Rakennusten paloturvallisuus ja Paloturvallisuus korjausrakentamisessa” avulla. [1] [2]

Aikaisemmin mainittuja rakennusten käyttötaparyhmiä ovat esimerkiksi asunnot, hoitolaitokset, kokoontumis- ja liiketilat, työpaikat, tuotanto- ja varastotilat sekä autosuojat [1]. Kuitenkin jo pelkästään yhden rakennuksen sisällä voi olla useita eri käyttötarkoitukseen tarkoitettuja tiloja. Näin ollen samaan rakennukseen kuuluvia eri palo-osastojakin jaetaan edellisten ryhmien välillä erilaisiksi tiloiksi paloturvallisessa mielessä. Käyttötarkoituksensa mukaan jaettujen palo-osastojen välillä on toisistaan poikkeavia vaatimuksia ja määräyksiä rakenteiden paloturvallisuuden suhteen, joista kerrotaan tarkemmin luvussa osastoivat rakenteet.

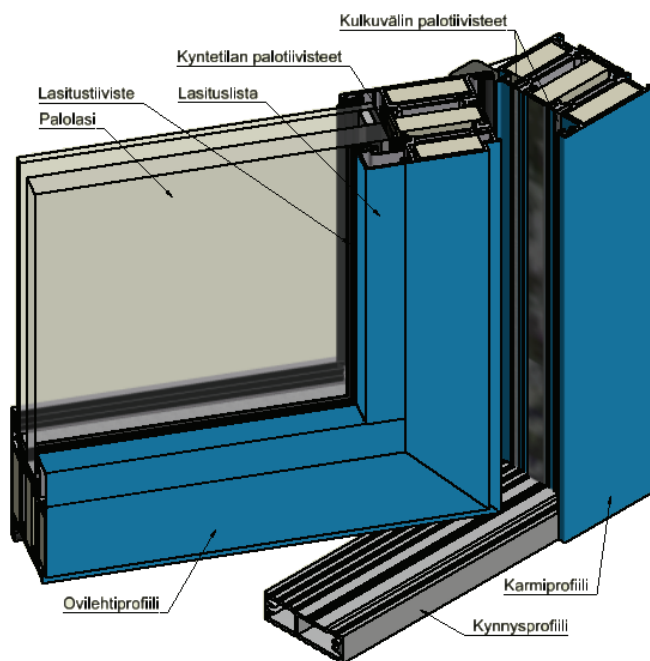
Rakennuksien seinät, katot ja lattiat jakavat rakennuksien eri osat tiloiksi. Tilan katon ja lattian avulla toteutetaan rakennuksen kerrososastointi, sillä yleensä eri kerrok-

set jaetaan automaattisesti omiksi palo-osastoikseen. Tilojen seinät voivat olla luonteeltaan joko kantavia tai kantamattomia. Kantavien seinien täytyy kestää seinärakenteen oman massan lisäksi myös muista rakenteista kyseiseen seinään kohdistuvia kuormituksia, kun taas kantamattomissa seinissä rakenteen tulee kestää vain rakenteen omasta painosta muodostuva kuormitus. Kantavat seinät tyypillisesti ovat raskastekoisempia betoni- tai teräsrakenteita, kun taas kantamattomat seinät voivat olla myös kevyempiä väliseiniä, jotka ovat tehty esimerkiksi erilaisista levyistä tai kiinteistä lasista, joissa on metalli- tai puukehikko. On hyvä huomioda, että kevyet väliseinät, joilla ei ole paloteknisessä mielessä suojaavaa kykyä, eivät rajoita palo-osastoa, vaan ne katsotaan sisältyvän jonkin suuremman palo-osaston kerrosalaan.

Seinärakenteissa on tavallisesti myös avautuvia aukkoja, kuten esimerkiksi ovia, ikkunoita tai luukkuja. Aukkojen paloturvallisuusvaatimuksissa on hieman poikkeavuuksia seinärakenteisiin verrattuna, joten niille löytyy omia tarkennuksia ja määräyksiä testaus- ja luokitusstandardeista. Kuitenkin esimerkiksi ovien yhteydessä voi olla myös ylä- tai sivupieliä tai avautuvien ikkunoiden vieressä kiinteitä ikkunoita, jotka ovat tehty samasta rakennusjärjestelmästä kuin itse aukkokin. Tällöin ne katsotaan tietyissä kokorajoissa kuuluvaksi olennaisena osana joko oveen tai avautuvaan ikkunaan, joten ne testataan ja luokitellaan yhtenä suurempana elementtinä. Kuvassa 2.1 on esitetty osastoiva pariovi, jonka yhteydessä on sivu- sekä yläpieli. Alumiinisen palo-ovijärjestelmän tärkeimpiä profiileita ja osia on taas esitetty kuvan 2.2 mallinurkassa.



Kuva 2.1. Osastoiva pariovi sekä sen ylä- ja sivupieli.



Kuva 2.2. Osastoivan oven mallinurkka, jossa havainnollistettuna järjestelmän olennaisimmat profiilit sekä osat.

Rakennuksen paloluokille käytetään kolmea eri luokitusta, jotka ovat P1, P2 ja P3. Paloluokat jakavat rakennukset niiden koon, palokuorman ja sallitun henkilömäärän sekä rakenteiden kestävyys mukaan eri ryhmiin. Hyvänä muistisääntönä rakennusten paloluokituksille voidaan pitää, että paloluokkaan P1 kuuluvat kerrostalot, luokka P2

kattaa teollisuusrakennukset ja luokkaan P3 sisältyvät muut pientalot. Toisaalta rakennusosille sekä -tarvikkeille, joita rakennuksissa käytetään, löytyvät erikseen omat tarkemmat luokituksensa standardeista. Rakennusosien kohdalla luokitus pohjautuu rakenteen palonkestoon, sekä rakennustarvikkeiden osalta palon syttymiseen ja leviämiseen sekä palon aiheuttaman savuntuoton ja palavan pisaroinnin määrään. Rakennuksen paloluokituksen yhteydessä määritellään rakentamismääräyskokoelmassa esitetyllä tavalla luokitusten vähimmäistaso, joka kyseisessä rakennuksessa käytettäviltä rakennusosilta ja -tarvikkeilta vaaditaan. [1]

Rakennusosien ja -tarvikkeiden luokituksessa käytetään eurooppalaisia EN -standardeja ja niiden suomalaisiksi kansallisiksi standardeiksi vahvistettuja SFS-EN -versioita. Rakennusosille ja useimmille rakennustarvikkeille tulee hakea käytännön testausten avulla tyyppihyväksyntä tai luokituksenarvo. Testaus suoritetaan rakennusjärjestelmätyypille soveltuvan testausstandardin mukaan, jonka jälkeen tyyppihyväksyntä tai luokitusraportti kirjoitetaan omaan luokitusstandardiin perustuen. Joillekin rakennustarvikkeille kuitenkin löytyy rakentamismääräyskokoelmasta taulukko, jonka mukaan kyseinen rakennustarvike voidaan useimmissa tapauksissa katsoa kuuluvan tiettyyn luokkaan ilman testausta ja erillistä luokitusta. Useimmissa tapauksissa paloluokitus joudutaan kuitenkin määrittelemään käytännöntestauksen avulla. [1]

2.1 Osastoivat rakenteet

Tulipalon sattuessa tulee rakennuksen tiettyjen rakenteiden kestää vaadittu vähimmäisaika sortumatta. Tulipalo myöskään saa päästä leviämään muihin lähistöllä sijaitseviin rakennuksiin. Tulipalon tulee myös rajoittua rakennuksen sisällä halutun kokoiseen osastoon, mutta kuitenkin sillä tavalla, että rakennuksessa olevat henkilöt voivat turvallisesti poistua rakennuksesta tai heidät voidaan muulla tavoin pelastaa tulipalosta. Lisäksi palokunnan ja muun pelastushenkilökunnan tulee pystyä turvallisesti rajoittamaan ja estämään tulipalon etenemistä sekä sen kehitystä mahdollisimman vähän itseään vaarantamatta. Osastoivilla rakenteilla yhdessä palonkestävien rakennustarvikkeiden kanssa mahdollistetaan edellä mainittujen asioiden toteutuminen ja edesautetaan paloturvallisuusvaatimusten täyttymistä. [1]

Rakennusosien luokitus ilmoitetaan merkinnällä ja sen jälkeen tulevilla palonkestävyysajalla, esimerkiksi EI60. Kirjainmerkintä kertoo tarkemmin millaisia ehtoja rakenne toteuttaa. Palonkestävyysaika taas kertoo minuuttimäärän, kuinka kauan merkinnän asettamia ehtoja kyseisen luokituksen saanut rakenne vähintään kestää. Palonkestävyysaika on jokin luvuista 15, 30, 45, 60, 90, 120 tai 240. [1]

Merkinnällä E ilmaistaan rakenteen tiiviyyttä (integrity) ja merkintä I tarkoittaa lämmöneristyskykyä (insulation). Edellä mainitun eristyskyvyn rinnalla käytetään oville ja tietyille ikkunatyypeille myös tarkentavia eristyskyvyn merkintöjä I₁ ja I₂. Lisäksi omat merkintänsä löytyvät rakenteen kantavuudelle (R, loadbearing capacity), säteilytehon määrälle (W, radiation), iskunkestävyydelle palotilanteessa (M, mechanical action), ovien ja ikkunoiden automaattiselle sulkeutuvuudelle (C, self-closing), savukaasujen

vuodolle (S, smoke leakage), liekkien kestävyydelle (G, 'soot fire' resistance) sekä seinien ja kattojen palonsuojauskyvylle (K, fire protection ability). Paloluokitusten merkintöjen vaatimuksista ja niiden täyttymisehdoista kerrotaan tarkemmin työn myöhemmissä luvuissa. [1] [3]

Rakentamismääräyskokoelmassa määritellään, että osastoivien ovien ja ikkunoiden sekä muiden pienekköiden aukkojen luokituksen palonkestävyysajan täytyy olla vähintään puolet siitä rakennusosan palonkestävyysajasta, johon kyseinen aukko on kiinnitetty. Näin ollen, jos seinärakenteelta vaadittava paloluokitus on EI120, voidaan siihen asentaa palo-ovi, jonka luokitus on EI60. Rakentamismääräyskokoelman mukaan EI120 luokitus vaaditaan paloluokassa P1 tai 3-8 kerroksisissa P2 luokan rakennuksissa, joissa palokuorma on yli 1200 MJ/m^2 . Edellä mainittu luokkavaatimus on myös suurin luokkavaatimus osastoivalle rakennusosalle Suomessa, pois lukien palomuurit, joten ovien ja ikkunoiden kohdalla ei varsinaisesti ole tarvetta korkeammalle paloluokitukselle kuin EI60. [1]

Paloluokituksen merkinnät viittaavat erilaisiin ominaisuuksiin, joita rakenteelta vaaditaan palotilanteessa. Jotkut ominaisuudet tulevat olennaisiksi vain tietyissä tilanteissa, kun taas osa ominaisuuksista käsittelee paljon yleisempiä vaatimuksia. Esimerkiksi rakenteen tiiviys ehdot voidaan olettaa hyvinkin tavanomaiseksi vaatimukseksi osastoivalta rakenteelta, mutta automaattinen ovien sulkeutuminen tulee kyseeseen vain harvassa tapauksessa. Toisaalta jotkin ominaisuudet voivat jossakin määrin sisältyä toisten ominaisuuksien vaatimuksiin tavalla tai toisella. Esimerkiksi rakenteen, joka läpäisee lämmöneristävyydeltä edellytetyt ehdot, voidaan samalla olettaa täyttävän myös säteilytehon läpäisyn vaatimukset. Ominaisuuksista rakenteen kantavuus (R), tiiviys (E) sekä lämmöneristyskyky (I) ovat niin sanottuja rakenteen pääominaisuuksia, joista jollakin tai niiden yhdistelmälle haetaan hyväksynnässä luokitusta. Yleisimmät Suomessa käytössä olevat kantamattomien rakenteiden paloluokitukset ovat E, EW ja EI. Muut ominaisuudet toimivat apuominaisuuksina, joiden avulla voidaan ainoastaan täydentää pääominaisuuksien toimintoja halutulla tavalla.

Rakennuksilla ja rakennusten sisällä olevilla osastoilla on eri käyttötarkoituksista riippuen hyvinkin erilaisia tarpeita paloturvallisuuden suhteen, joten myös niissä käytettävillä rakenteilla on erilaisia vaatimuksia rakenteiden luokitusominaisuuksien puolesta. Näin ollen osastoivien rakenteiden ei tarvitse täyttää kaikkia standardeissa esitettyjä vaatimuksia, vaan rakenteen valmistaja voi hakea luokitusta vain haluamilleen ominaisuuksille omien intressiensä mukaisesti. Myös yrityksen kulujenhallinnan kannalta on järkevää täyttää vain tarpeelliset vaatimukset, sillä lähes poikkeuksetta useamman ominaisuuden lisääminen yhteen ja samaan rakenteeseen tarkoittaa yleensä kasvannutta osien määrää, arvokkaampia materiaaleja, monimutkaisempaa konstruktiota tai muuten vain kalliimpaa lopputuotetta. Kannattavampaa onkin pyrkiä valmistamaan osastoivien rakenteiden tuoteperhe, jossa perusrakenteeseen joko vaihdetaan tai lisätään osia, jolloin myös rakenteen luokitusominaisuuksia saadaan vaihdettua tai lisättyä.

2.2 Osastoivilta rakenteilta vaaditut ominaisuudet

Osastoivilta rakenteilta vaadittavat ominaisuudet ovat määritelty tulipalon leviämisen estämiseksi erilaisissa tilanteissa. Näin ollen rakenteen niin sanottu kylmä puoli, joka on tulipalon vastakkainen puoli rakenteesta, pyritään eristämään selviltä ja ennalta-arvattavilta tulipalon aiheuttajilta ja sytyttäjiltä. Eri luokitusmerkinnöillä onkin tarkoituksena estää tiettyjen tulipalon aiheuttajien esiintyminen. Kirjainmerkintä paloluokituksessa sanelee ne ehdot, jotka rakenteen tulee täyttää palonkestävyysajan määrittelymääräajan aikana. Tässä luvussa esitellään kuitenkin ainoastaan rajat ja vaatimukset testattaville elementeille ja vasta työn myöhemmissä luvuissa kerrotaan testauksessa käytettävien testaus- ja mittalaitteiden edellytykset.

Merkinnällä E kuvataan rakenteen tiiviyyttä. Tällä tarkoitetaan rakenteen kykyä vastustaa tulipalon leviämistä siten, että kylmällä puolella ei tapahdu materiaalien syttymistä kuumista kaasuista tai liekeistä johtuen. Standardissa SFS-EN 13501-2 todetaan rakenteen tiiviysvaatimukset riittäviksi, kun rakenteeseen ei muodostu tiettyä kokoa suurempia rakoja tai aukkoja, kylmällä puolella ei esiinny jatkuvakestoisia liekkiä eikä polton aikana syttymisen tarkastelussa käytetty pumpulitukkolevy syty. Tiiviyskriteeri on voimassa aina siihen asti, kun kaikki edellä mainituista ehdoista vielä toteutuvat. Rakenteen palonkestävyysaika määräytyy näin ollen ominaisuuden E kohdalla ensimmäiseksi rikkoutuneen tiiviysehdon mukaan. [3]

Osastoivan rakenteen tiiviyyden (merkinnän E) tarkempi määrittely saadaan standardista SFS-EN 1363-1. Kyseisessä standardissa määritellään myös laitteet, joilla vaatimuksia tarkastellaan. Mahdollisesti muodostuvien rakojen tarkastelussa käytetään kahden erikokoista rakotulkkia. Toinen rakotulkeista on 6 mm ja toinen 25 mm halkaisijaltaan. Standardin mukaan rakenteeseen ei saa muodostua koko rakenteesta läpimeneviä aukkoja, joihin 6 mm:n rakotulkki mahtuu ja jossa se pystyy liikkumaan yli 150 mm raon tai aukon suunnassa. Standardissa määritellään lisäksi, että 6 mm:n rakotulkkia ei kuitenkaan käytetä lattiatasossa oleville aukkoille, kuten esimerkiksi kynnyksraoille. 25 mm:n rakotulkki taas ei saa mennä mistään kohtaa rakenteen läpi asti uunin puolelle. Rakojen suuruutta tarkastellaan testauksen aikana aina, kun siihen ilmenee tarvetta ja tarkasteluintervalli pääosin määräytyy rakenteen heikkenemistahdin mukaisesti. Olenainen ohje rakojen tarkastelussa on, että rakotulkkien käytössä ei saa käyttää ylimääräistä voimaa, vaan rakotulkin on mentävä helposti koko rakenteesta läpi ja rakotulkin on liikuttava vähäisellä voimalla raon suuntaisesti. [3]

Lisäksi standardi SFS-EN 1363-1 yhdessä standardin SFS-EN 1634-1 kanssa sanelee, että ovi tai luukku ei saa aueta tai irrota testauksen aikana, eikä rakenteeseen saa myöskään syntyä läpimeneviä aukkoja, joiden kautta pumpulitukko pääsee syttymään. Pumpulitukon hiiltymistä tai tummumista ei lasketa eristävyyskriteerin hylkäämisen syyksi, vaan hylkäämiseen tarvitaan pumpulitukon syttyminen liekkeihin tai sen hehkuminen palamisesta johtuen. Pumpulitukkotestiä käytetään, jos polttotestauksen aikana rakenteeseen syntyy aukkoja tai rakoja, joista kuumia kaasuja tai liekkiä pääsee

rakenteen läpi. Lisäksi aukon tai raon kautta ei saa kylmälle puolelle syntyä yli 10 sekunnin kestoisia jatkuvia liekkiä. [4] [5]

Eristävyyden (merkinnän I) vaatimukset liittyvät lähinnä rakenteen kylmän puolen pintalämpötilan kohoamiseen. Rakenteen pintalämpötilan rajoittamisella pyritään estämään se, etteivät rakenteeseen koskettavat tai sen välittömässä läheisyydessä olevat materiaalit syttyisi rakenteen kuumuuden takia. Lämpötilan rajoittamisella haetaan myös sitä, että pelastustoiminta rakenteen kylmällä puolella olisi turvallisempaa ja rakenne muodostaisi riittävän lämpömuurin ihmisten suojaksi pelastustoiminnan ajaksi. [3]

Aukeaville ikkunoille ja oville löytyy kaksi eri vaatimustasoa lämmöneristävyyden paloluokituksen suhteen. Näistä tiukempi määritelmä (I_1) vaatii, että rakenteen kylmän puolen pintalämpötila ei saa missään kohta nousta yli 180 astetta testausjakson aikana sekä lisäksi keskimääräinen lämpötilan nousu rakenteessa on rajoitettu 140 asteeseen. Vaatimustason mukaan myös ikkunan tai oven karmin pintalämpötilan nousu tulee rajoittua 180 asteeseen, joka on mitattu yli 100 mm leveillä karmeilla 100 mm etäisyydeltä karmin näkyvästä reunasta tai muissa tapauksissa mitattuna mahdollisimman läheltä karmin ja sitä tukevan rakenteen liitoskohtaa. Hieman kevyempi lämmöneristävyystvaatus (I₂) rajoittaa pintalämpötilan nousun, vastaavalla tavalla kuin edellä, maksimissaan 180 asteeseen ja keskimäärin 140 asteeseen, mutta aukon karmien osalta lämpötilan nousu saa olla korkeintaan 360 astetta mitattuna samasta kohdasta kuin I₁:n tapauksessa. Rakenteen kiinteille osuuksille pätee pelkästään yksi eristävyysvaatus (I), jonka mukaan kiinteiden osien pintalämpötila ei saa missään kohdassa nousta yli 180 astetta ja keskimääräinen lämmön nousu on rajoitettu jo edellä tutuksi tulleeseen 140 asteeseen. [3]

Standardissa SFS-EN 1634-1 määritellään kuinka ja mistä kohdista testattavan elementin pintalämpötilaa tulee mitata. Standardin mukaan keskimääräistä lämpötilan nousua mitataan viidellä, eri paikkoihin sijoitetulla lämpötila-anturilla, joiden näyttämien keskiarvo kertoo lämpötilan keskimääräisen nousun. Maksimilämpötilannousua mitataan keskimääräisen lämpötilan seurantaan asetettujen anturien lisäksi pelkästään maksimilämpötilannousua mittaavien anturien avulla. Anturien kiinnityspaikat sekä myös paikat joihin antureita ei saa asentaa, ovat tarkoin määritelty edellä mainitussa standardissa ja niitä käsitellään lisää työn edetessä. [5]

Osastoivien rakenteiden kylmän puolen lähettämän säteilyn määrä on yksi ominaisuus, jota voidaan rakenteen luokituksen yhteydessä hakea. Rajoittamalla rakenteen kylmän puolen lämpösäteilyä, estetään kylmällä puolella olevia materiaaleja syttymästä liekkeihin lämpösäteilyä johtuen. Toisaalta rakenteen kylmän puolen lämpösäteilyn estämisellä suojataan kylmällä puolella olevia ihmisiä ja mahdollistetaan heidän turvallinen poistuminen ja pelastaminen rakennuksesta. Lämpösäteilyn määrää mitataan polttotestauksen aikana siihen soveltuvalla säteilymittarilla rakenteen kylmältä puolelta ja säteilyn teho ei saa testausjakson aikana ylittää missään vaiheessa arvoa 15 kW/m^2 , jotta säteilyn luokitusvaatus täyttyy. Toisaalta, jos rakenne täyttää kaikki eristävyyden kriteerit, niin yleisesti katsotaan rakenteen täyttävän samalla kertaa myös säteilyn luoki-

tusvaatimukset, sillä eristävyyskriteerin pintalämpötilat ovat niin alhaiset, että rakenne ei voi säteillä yhtä paljoa kuin asetettu raja sallii. Toisaalta taas rakenteessa ilmennyt vika, jonka vuoksi tiiviyskriteerit eivät enää täyty, johtaa automaattisesti myös säteilyn luokituksen epäonnistumiseen. [3]

Tulipaloissa muodostuva lämpö voi heikentää palo-osaston sisään jääviä muita rakenteita tai massiivisia esineitä. Sortuessaan tai kaatuessaan nämä rakenteet ja esineet voivat aiheuttaa osastoivan rakenteen pettämisen iskun vaikutuksesta. Tällaisen riskin varalta voidaan osastoiva rakenne luokitella iskunkestävyyden (M) suhteen palotilanteessa. Kyseinen luokitusvaatimus täyttyy, jos rakenne polttotestausjakson loputtua kestää tietyn suuruisella voimalla kohdistetun iskun siten, että muut poltossa testatut ominaisuudet (esimerkiksi E, I tai W) eivät olennaisesti heikkene iskun vaikutuksesta ja edelleen täyttävät niille asetetut vaatimukset. Luokitusta M tarvitaan yleensä vain erityisten palomuurien kohdalla, jollainen vaaditaan vain hyvin harvoissa tilanteissa. [3]

Paljon käytettävien ovien ja aukeavien ikkunoiden sekä normaalisti auki olevien kulkuteiden on ehdottoman tärkeää sulkeutua tiiviisti ja varmasti tulipalon sattuessa. Jos ovi tai avautuva ikkuna on varustettu mekanismilla, jonka avulla aukko sulkeutuu automaattisesti ilman ihmisvoimaa jokaisen avauksen jälkeen, tai laitteistolla joka sulkee aukon ohjelmoidusti tulipalon sattuessa, voi ovi tai avautuva ikkuna saada merkinnän C luokituksen yhteydessä. Automaattisen sulkeutumisen luokitus tapahtuu kestävyystestinä, jossa suljinlaitteistoa kulutetaan käyttötarkoituksen määrittelemän syklimäärän verran, jonka jälkeen suoritetaan varsinainen rakenteen polttotestaus. Lisäksi sulkeutumislaiteiston tulee reagoida yhtäaikaaisesti muun palohälytysjärjestelmän kanssa sekä säilyä toimintakuntoisena myös palohälytyksen jälkeen, vaikka järjestelmässä sattuisi yllättävä sähkökatkos tai muu häiriö. [6]

Luokituksen S rakenne saa, kun elementti pystyy estämään tai olennaisesti vähentämään tulipalossa syntyvien kaasujen ja savun pääsyä rakenteen läpi testauksen aikana [3]. Myrkyllisten savukaasujen eristäminen rakenteen kylmältä puolelta on yksi turvallisen pelastautumisen edellytyksistä. Savukaasujen estämisellä rakenteen läpi pyritään lisäksi vähentämään savusta aiheutuvia aineellisia vahinkoja rakenteen kylmällä puolella.

Osastoivan rakenteen luokituksen yhteydessä voidaan edellä mainittujen lisäksi hakea hyväksyntää myös muille ominaisuuksille, jotka tämän työn kannalta eivät kuitenkaan ole kovin olennaisessa osassa. Tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi rakenteen kuormankantokyky (R), liekkien kestävyys (G) ja seinien tai kattojen palonsuojauskyky (K). Kuormankantokyvyn vaatimuksena on, että oman massansa lisäksi muuta kuormaa kannatteleva elementti säilyttää rakenteellisen lujuutensa tulipalon sattuessa. Lähinnä savupiipuille tarkoitettussa liekkien kestävyys testauksessa elementti altistetaan äärimmäisille olosuhteille, joilla simuloidaan elementin suoraa kontaktia liekkeihin. Jos elementti kestää ilman rakojen muodostusta ja eristävyys heikkene mistä edellä mainitun suoran kontaktin liekkeihin, myönnetään sille G-luokitusmerkintä. Palonsuojauskyvyllä taas tarkoitetaan ominaisuutta, jonka avulla voidaan varmistaa, etteivät seinä- tai kattoelementin takana olevat materiaalit pääse syttymään, hiiltymään

tai muuten vaurioitumaan tulipalossa. Palonsuojauskyky on erityisen tärkeässä asemassa kantavien rakenteiden suojauksessa, jotta niiden lujuusominaisuudet säilyvät tulipalosta huolimatta.

2.3 Rakenteiden polttotestaus

Virallisen polttotestauksen suoritus on palo-ovien kohdalla tarkkaan määritelty standardeissa SFS-EN 1363-1 sekä SFS-EN 1634-1. Standardi SFS-EN 1363-1 on palonkestävyystestien yleisiä vaatimuksia sisältävä standardi ja SFS-EN 1634-1 on varsinainen ovien ja luukkujen testausstandardi. Testauslaitteiston vaatimukset sekä itse testattavan elementin esivalmistelut, kokoaminen ja testausuuniin kiinnittäminen ovat selostettuina kyseisissä standardeissa. Osastoivan rakenteen luokitus taas tapahtuu standardin SFS-EN 13501-1 mukaan, joka on kaikkien rakennustuotteiden ja -osien yhteinen paloluokitusstandardi.

Standardien esittämien vaatimusten avulla pyritään varmistamaan, että testauksen läpäisseet elementit varmasti toimivat halutulla tavalla tulipalon sattuessa. Tiukkojen testausproseduurien avulla pyritään lisäksi minimoimaan erilaisten muuttujien vaikutus testaustulokseen. Standardeissa kuitenkin mainitaan, että testauksen luonteesta johtuen, joka on hyvin työpainotteinen sekä vaatii kokemusta testien suorittajilta, jää testeihin väkisinkin paljon tekijöitä, jotka voivat olennaisesti vaikuttaa tuloksiin. Näitä tekijöitä on kuitenkin hankalaa ja jopa mahdotonta poistaa testauksesta, eikä niille pysyttyä edes määrittämään numeerista kerrointa tekijöiden vaikutuksien huomioon ottamiseksi testauksessa. Tästä syystä on hyvin harvinaista, mutta täysin mahdollista, että toisessa testissä hyvin suoriutunut elementti voi uusintatestin aikana epäonnistua ja johtaa luokituksen hylkäykseen. [4]

2.3.1 Testauslaitteisto

Standardi SFS-EN 1363-1 käy tarkasti läpi kaikki testauslaitteistoon kuuluvat osat niiden vaatimuksineen ja erilaisine rajoituksineen. Tässä luvussa esitellään olennaisimmat asiat testauslaitteistosta, joista suurin osa joudutaan ottamaan tarkasti huomioon myös työn myöhemmässä vaiheessa pientä polttouunia rakennettaessa.

Polttotestauslaitteisto rakentuu testauksessa käytettävän polttouunin ympärille. Polttotestausta varten rakennetun uunin rungon lisäksi olennaisina osina polttouuniin kuuluvat poltinjärjestelmä ja sen säätölaitteisto, testattavan elementin kiinnitysjärjestelmä sekä uunin sisäolosuhteiden, kuten paineen, hallintajärjestelmät. Lisäksi testauslaitteistoon tarvitaan elementin kuormituslaitteita, jos halutaan testata ja tarkastella elementin kantavuutta ja iskunkestävyyttä sekä tietysti myös mittalaitteita ja -antureita, joilla seurataan testissä kulunutta aikaa, uunin palokaasujen happipitoisuutta, painetta ja sisälämpötilaa, elementin pintalämpötiloja ja elementin taipumista testin aikana sekä rakojen suuruutta ja niiden kriittisyyttä. [4]

Polttouunin runko voi olla suunniteltu pysty- tai vaakasuuntaisten elementtien testausta varten, joita poltetaan vain yhdeltä suunnalta. Toisaalta löytyy myös poltto-

uuneja erilaisia seiniä sekä pysty- tai vaakapalkkeja varten, joita poltetaan samalla kertaa useammalta kuin vain yhdeltä sivulta. Uunit voivat lisäksi olla rakennettu siten, että useamman kuin yhden testielementin poltto onnistuu samanaikaisesti, kunhan uunin rakenne varmistaa sen, etteivät elementit vaikuta toistensa testituloksiin. Uunien rakenteesta on polttostandardeissa määritelty tarkat rajat, kuten esimerkiksi minkälaisista materiaaleista uunin runko tulee valmistaa ja kuinka paksut seinämät uunissa tulee olla. Lisäksi uunin suorituskyvyn verifioimiseen löytyy oma esistandardinsa ENV 1363-3, jonka avulla voidaan varmistua polttouunin soveltuvuudesta testaukseen.

Polttouunin lämmönlähteenä käytettävistä polttimista ei varsinaisesti anneta muita ehtoja kuin, että niiden avulla tulee pystyä muodostamaan annettujen toleranssirajojen sisällä polttostandardissa määritelty lämpötilakäyrä. Kyseinen lämmityskäyrä on annettu standardissa SFS-EN 1363-1 sekä paremmin havainnollistettu kuvassa 2.3. Uunin sisälämpötilan [$^{\circ}\text{C}$] lämmityskäyrän tulee noudattaa seuraavaa kaavaa polttotestin alusta minuuteissa lasketun ajan t suhteen

$$T = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

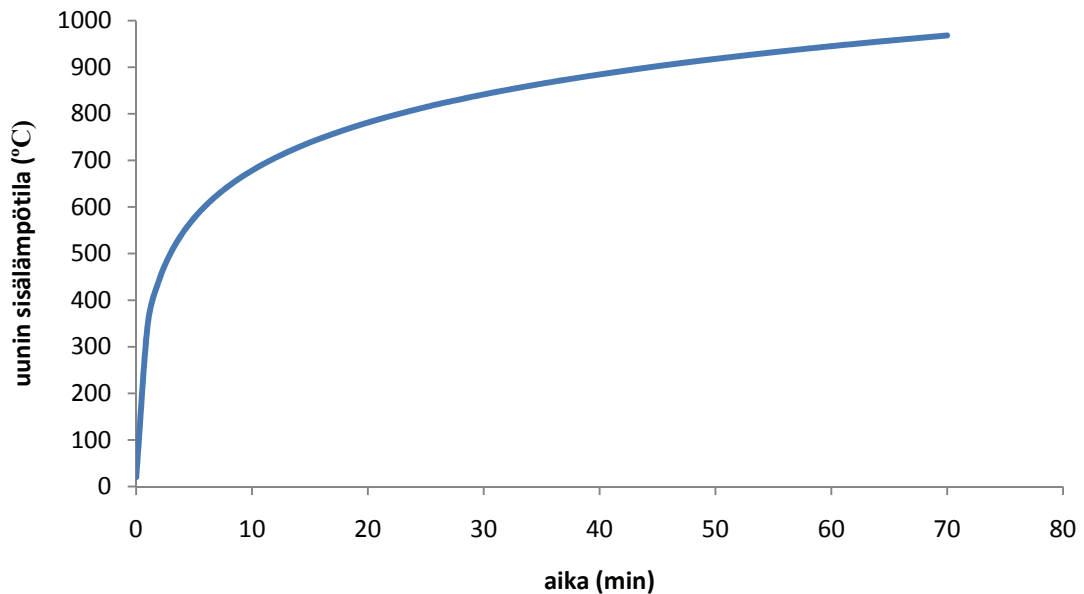
Polttimissa voidaan käyttää joko kaasumaisia tai nestemäisiä polttoaineita, joten vaihtoehtoja eri lämmönlähteiksi löytyy useita. Poltinten käytön tulee kuitenkin olla turvallista ja tästä syystä uunin poltinten suurimmat vaatimukset asetetaan kansallisissa laeissa ja määräyksissä kyseisten polttoaineiden käytön osalta. Polttouunin poltinten teho on erittäin suuri, jotta tarvittavan korkea lämpötila uuniin saadaan muodostetuksi. Tästä syystä poltinten asennus ja myös niiden käyttö vaativat harjaantumista ja kokemusta erittäin suuren tapaturmariskin ja onnettomuuksista aiheutuvien vakavien seurausten johdosta. Myöhemmin työssä käsitelläänkin esimerkinomaisesti pientä polttouunia rakennettaessa nestekaasun käytössä ilmeneviä vaatimuksia ja määräyksiä Suomessa, joita noudattamalla kaasupoltinten käytöstä saadaan turvallisempaa.

Polttostandardeissa annettu lämpötilakäyrä (1) tulee toteutua tiettyjen toleranssirajojen sisällä. Toleranssirajat määritellään prosentuaalisina osuuksina testin alkuhetkestä lähtien lämpötilakäyrän (1) alle muodostuvaan pinta-alaan verrattuna, joka lasketaan käyrän lämpötilan aikaintegraalina. Prosentuaalinen osuus määräytyy kaavan

$$d_e = \frac{S \cdot S_s}{S_s} \cdot 100 \quad (2)$$

mukaan, jossa S on todellinen testistä saadun lämmityskäyrän alapuolelle jäävä pinta-ala ja S_s on standardikäyrästä laskettu pinta-ala. Prosentuaalisen osuuden sallittu vaihtelu eli toleranssin suuruus saadaan jokaisella ajanhetkellä testin alusta kuluneeseen aikaan suhteutettuna standardeissa annettujen laskukaavojen mukaisesti. Yksinkertaistettuna, toleranssirajat ovat alkuhetkinä väljemmät, mutta kiristyvät nopeasti logaritmisena käyrän tavoin testin edetessä. Testin alussa sallitaan jopa 15 % heitto aikaintegraalissa, kun taas puolen tunnin kohdalla testin alusta vaihtelu saa olla noin 5 % ja tunnin jälkeen

enää vain 2,5 % standardikäyrän tarkkaan arvoon verrattuna. Prosentuaalisen vaihtelun lisäksi on uunin sisälämpötilalle erikseen annettu lisäehto, jonka mukaan 10 minuutin jälkeen se ei saa erota tarkasta lämpötilakäyrän arvosta enempää kuin 100 K, vaikka standardikäyrän mukainen prosentuaalinen osuus täytyisikin. [4]



Kuva 2.3. Standardin SFS-EN 1363-1 mukainen polttouunin lämmityskäyrä testin alusta kuluneen ajan suhteen.

Testattavan elementin kiinnityskehä on yksi erityisen tärkeä osa uunia. Standardit eivät varsinaisesti ota kantaa kiinnityskehän ominaisuuksiin. Kiinnityskehän avulla tulee ainoastaan pystyä mahdollistamaan elementin kiinnitys uuniin siten, että uunin lämpötilankasvu ja paineenmuodostus ovat toteutettavissa [4]. Kiinnityskehän avulla voidaan uuniin kiinnittää myös erikokoisia testattavia elementtejä, tarpeiden mukaisesti. Standardikokoisen uunin pystyelementin maksimikoko on 3 x 3 m, jonka suuruisia huomattava osa testattavista ovi- ja ikkunakonstruktioista ovat. Kiinnityskehään voidaan kuitenkin helposti muodostaa myös pienempiä aukkoja, kuten esimerkiksi yksittäisten ovien ja ikkunoiden polttotestausta varten. Polttotestaus tulee lisäksi pystyä suorittamaan elementin eri kiinnitystavoilla sekä erilaisiin rakenteisiin kiinnitettynä. Kiinnityskehän rakenne voi olla joko suuri- tai pienitiheyksistä jäykkää rakennetta, yleensä betoniseinää tai mahdollisesti kevyempirakenteista, taipuisaa seinärakennetta, kuten esimerkiksi teräsrunkoista kipsilevyseinää. Näin ollen kiinnityskehien rakenne voi vaihdella ja silti voidaan käyttää samaa polttouunia eri kiinnitystapojen testaamiseen.

Mittalaitteista tärkeimpiä ovat lämpötila-anturit, joilla seurataan uunin sisälämpötilaa sekä testattavan elementin pintalämpötiloja. Sisälämpötilan mittauksessa käytetään levymäisiä termoelementtejä, joissa taivutetun nikkelseoslevyn väliin on kiinnitetty tyypin K termoparin johtimet eristeineen standardissa SFS-EN 1363-1 selitettyjen tarkkojen määritysten mukaisesti. Kooltaan näiden levymäisten termometrien tulee olla 150 mm korkeita, 100 mm leveitä sekä 0,7 mm paksuja. Lämpötilat uunissa ovat niin korkeita, että levyantureiden ominaisuudet muuttuvat ensimmäisten käyttökertojen ai-

kana. Tästä syystä levyanturit täytyy sisäanjaa ennen niiden varsinaista käyttöä. Lisäksi korkeista lämpötiloista johtuen levyantureiden käyttöikä on varsin rajallinen ja ne joudutaan vaihtamaan vähintään 50 käyttötunnin jälkeen uusiin mittaustarkkuuden heikentymisen takia. [4]

Testattavan elementin pintalämpötiloja mitataan vastaavanlaisilla tyypin K termopariantureilla kuin uunin sisälämpötilaakin. Erona näiden kahden lämpötilan mittauksen välillä on, että elementin pintalämpötilat ovat huomattavasti alhaisempia, mutta toisaalta kyseisten anturien tulee kyetä mittaamaan pintalämpötila huomattavasti paremmalla tarkkuudella. Näin ollen pintalämpötiloja mitattaessa kriittiseksi tekijäksi muodostuu hyvän termisen kontaktin luominen mitattavan pinnan ja anturin välille. Tästä syystä termoparin langat kiinnitetään ohueen kuparikiekkoon, joka on 0,2 mm paksu ja halkaisijaltaan 12 mm. Jotta lisäksi vältetään ympäristön häiriötekijöiltä, lisätään anturin kiinnityskohtaan kuparikiekon päälle vielä eristelevykerros. Jos anturin kiinnityskohdan pinta elementissä ei ole tasainen, voidaan mahdollisesti joutua muotoilemaan kuparikiekko ja eristelevy halutunlaisiksi, jotta pystytään aikaansaamaan tiivis kontakti mittauskohdan ja anturin välille. [4]

Lämpötila-antureiden mittatarkkuuksille on standardissa SFS-EN 1363-1 annettu omat rajansa. Uunin sisälämpötilan mittauksissa käytettyjen antureiden tulee toimia toleranssialueella $\pm 15\text{ K}$ sekä pintalämpötilojen ja ympäristön lämpötilan mittauksissa käytettyjen antureiden osalta $\pm 4\text{ K}$ alueella. Mittauksissa käytettäville tyypin K termopariantureille tyypillinen toleranssiraja alle 300 °C lämpötiloissa on noin $\pm 2\text{ K}$ ja 1000 °C lämpötiloissakin mittaustoleranssi on noin 0,8 % mittaustuloksesta eli noin $\pm 8\text{ K}$ [7]. Näin ollen K tyypin termoparianturit soveltuvat hyvin näihin käyttötarkoituksiin.

Testattavan elementin tiiviyskriteerijä tarkkailtaessa polttotestauksen aikana käytetään apuna kahta erikokoista rakotulkkia sekä erityistä pumpulitukkoa, joiden mallikuvat ovat esitetty kuvassa 2.4. Rakotulkit, jotka ovat halkaisijoiltaan 6 ja 25 mm, ovat yksinkertaisia pyöröterästankoja, jotka ovat kiinnitetty sopivan mittaisen varren avulla kuumuudelta eristettyyn kahvaan. Pumpulitukko taas on uudesta, värjäämättömästä, käsittelemättömästä ja pehmeästä 100 % puuvillasta valmistettu 100 x 100 x 20 mm kokoinen pumpulilevy. Pumpulilevy laitetaan teräslangasta taivutellun kehikon sisään, joka vastaavalla tavalla kuin rakotulkkien tapauksessa on varustettu lämpöeristetyllä kahvalla ja sopivan mittaiselle varrella. Lisäksi teräslankakehikkoon on muodostettu 30 mm pitkät jalat, joiden avulla varmistetaan, että pumpulitukko pysyy standardissa SFS-EN 1363-1 määritellyn etäisyyden päässä testattavan elementin pinnasta sitä käytettäessä testauksen aikana. [4]



Kuva 2.4. Mallikuvat pumpulitukosta sekä rakotulkeista.

Elementin kantavuutta testattaessa uunin varustukseen tarvitaan erityinen kuormituslaitteisto, joka voidaan toteuttaa mekaanisesti, hydraulisesti tai yksinkertaisesti painojen avulla. Vaatimuksena kuormituslaitteistolle on, että elementtiä pystytään kuormittamaan joko pistemäisellä, tasaisella, aksiaalisella, keskeisellä ja/tai epäkeskeisellä kuormituksella. Kuormituksesta ja lämpötilaeroista johtuvaa testattavan elementin taipumista mitataan joko mekaanisesti, optisesti tai elektroniikkaa hyödyntäen. Lisäksi testilaitteistoon tarvitaan anturit, joilla mitataan uunin palokaasujen happipitoisuutta sekä uunissa muodostuvaa polttoaineen palamisesta aiheutuvaa paineen kasvua. [4]

2.3.2 Testattavan elementin esivalmistelut

Ennen kuin varsinainen polttotestaus voidaan suorittaa, tulee testattava elementti valmistaa ja valmistella testausta varten. Elementin kokoamiseen ja muihin pakollisiin esivalmisteluihin on standardissa SFS-EN 1363-1 annettu ohjeistus kuinka ne tulee suorittaa. Testattavan elementin esivalmisteluvaiheet tulee lisäksi dokumentoida, sillä kyseisiä tietoja tarvitaan testiraporttia kirjoitettaessa ja elementin paloluokitusta määriteltäessä. Esivalmisteluiden dokumentoinnista on myös huomattavasti apua, jos ja kun poltto-testauksen jälkeen halutaan analysoida testistä saatuja tuloksia rakenteen kehittämiseksi.

Testattavan elementin valmistus käynnistyy tarpeen määrittämisellä, jolla päätehtään millaiselle elementille testiraportti halutaan kirjoitettavan. Elementin muodolla, koolla ja heloilla on paljon merkitystä siinä vaiheessa, kun testiraportin tuloksia halutaan soveltaa hieman testatusta elementistä poikkeavalle konstruktiolle. Testiraportin soveltamismahdollisuuksista puhutaan jäljempänä omassa luvussaan lisää, jossa selvitetään huomioonotettavat seikat, kun halutaan suorittaa mahdollisimman vähäinen testien määrä, mutta kuitenkin halutaan testiraporttien kattavan riittävän suuri määrä erilaisia, vaihtoehtoisia rakenteita.

Testattava elementti tulee valmistaa täsmälleen samalla tavalla ja niiden haluttujen toleranssien sisällä kuin se käytännössäkin tulee tapahtumaan. Mitään, millä mahdollisesti voi olla vaikutusta testin tuloksiin, ei saa jättää pois elementistä tai lisätä siihen jälkikäteen. Lisäksi kaikki käytettävät lisämateriaalit, ovien ja ikkunoiden helat sekä pintakäsittelyt täytyy olla sellaiset kuin ne lopullisessa käyttökohteessakin tulevat olemaan. Myöskään erilaisia elementin kokoonpanovariaatioita, kuten esimerkiksi erityyppisiä liitostapoja, ei saa sekoittaa yhteen testielementtiin, vaan eri variaatiot tulee testata

omissa koepoltoissaan. Ainoastaan sellaiset muutokset varsinaiseen testielementtiin sallitaan, joilla ei ole ollenkaan tai on vain hyvin vähäinen vaikutus elementin käyttäytymiseen testin aikana. Kaikki informaatio elementin kokoamisesta ja käytetyistä menetelmistä dokumentoidaan testiraporttiin. [4]

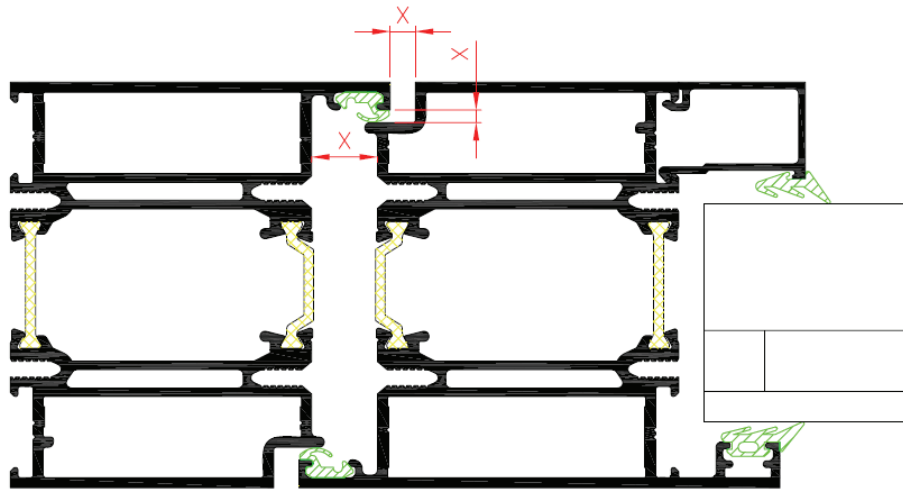
Testattavan elementin valmistaja on vastuussa siitä, että työn laatu ja tietojen oikeellisuus vastaavat tuotteen ominaisuuksia käytännössä. Valmistajan tehtävänä on myös välittää tarvittavat tiedot rakenteesta testin suorittavalle laboratoriolle, jotta kyseiset tiedot pystytään lisäämään testiraportin yhteyteen. Nämä tiedot tulee lisäksi toimittaa riittävän ajoissa ennen virallista testaustapahtumaa, jotta testilaboratorio kykenee ja ehtii tarkistamaan tietojen oikeellisuuden ja selvittämään mahdolliset ristiriidat jo ennen testin suorittamista. Jos testielementin verifiointi ei onnistu ilman testattavan elementin rikkomista tai elementin tarkastelu testin jälkeen on mahdotonta, voidaan tietojen oikeellisuus varmistaa joko testielementin kokoamista seuraamalla, ylimääräisen testielementin avulla tai äärimmäisissä tapauksissa kolmannen tahon tekemänä tutkimuksena. Testin tekevän laboratorion tulee lisäksi seurata testielementin kiinnitystä uuniin, jotta testiraporttiin voidaan lisätä tarvittavat tiedot kiinnityksen suorituksesta. [4]

Yhtenä vaiheena ennen polttotestin suoritusta on testattavan elementin tilan varmistaminen käytännön olosuhteita vastaavalle tasolle. Elementin lujuuden ja kosteuspitoisuuden tulee olla vastaavalla tasolla kuin se on normaalissa käytössäkin. Tästä syystä testattavaa elementtiä pidetään ympäristössä, jonka suhteellinen kosteus on 50 % ja lämpötila 23 °C, kunnes tasapainotila on saavutettu. Myös uunin rungossa ja kiinnityskehässä käytettäville betonisille ja muuratuille osille tulee suorittaa riittävä kuivatus, jotta varmistetaan, että näiden osien kosteuspitoisuus ei vaikuta testin tuloksiin. Betonivalujen kohdalla tämä tarkoittaa vähintään 3 kuukauden ja muuratuilla osilla vähintään 28 päivän kuivumisaikaa ennen testin suorittamista. [4]

Ovilehden ja sen karmin profiilien väliin jää aina pieniä välyksiä, jotta ovi käytännössä toimisi sille tarkoitettulla tavalla, eikä osuisi oven karmiosaan sitä avattaessa. Lisäksi valmistusteknisistä syistä ovilehdelle ja karmille on annettava muutaman millin suuruiset toleranssiarvot, joiden väliin valmiin oven ja sen karmin mittojen tulee sijoittua, ja joiden sisällä ovi toimii kuitenkin vielä halutulla tavalla. Polttotestauksen yhteydessä testielementin valmistajan tulee ilmoittaa testilaboratoriolle haluamansa suunnitelluarvot minimi- ja maksimivälyksille [5]. Kuvassa 2.5 havainnollistetaan työssä tarkasteltavan ovijärjestelmän karmi- ja ovilehtiprofiilien väliin jäävien olennaisimpien välyksien mittauskohdat.

Ennen polttotestin suorittamista testattavasta elementistä mitataan edellä mainitut välykset tarkasti. Mittaukset tehdään mahdollisuuksien mukaan suoraan, mutta jos mittausten tekeminen suoraan on mahdotonta, käytetään tällöin apuna epäsuoria mittauksia sekä laskentaa, joka pohjautuu tiedossa oleviin rakennemittoihin. Tämän jälkeen ilmoitettujen ja mitattujen arvojen avulla lasketaan todellinen maksimivälitys, joka käytännönsovelluksissa kyseiselle rakenteelle sallitaan. Laskusäännön mukaan, jotta voidaan käyttää valmistajan ilmoittamaa maksimivälystä käytännössä, tulee testattavan elementin välysten olla ilmoitetun minimin ja maksimin avulla lasketun keskiarvon sekä

annetun maksimiarvon välissä. Esimerkiksi, jos valmistaja ilmoittaa välysten minimiarvoksi 4 mm ja maksimiarvoksi 8 mm, täytyy testattavan elementin välysten olla 6-8 mm välissä. [5]



Kuva 2.5. Oviprofiilien muodostaman kulkuaukon väliin jäävien välysten mittauskohdat.

Automaattisen sulkeutuvuuden luokitusta haettaessa, tulee testattavalle elementille suorittaa kestävyystesti ennen varsinaista polttotestausta. Kestävyystestissä ovea avataan ja suljetaan tietty syklimäärä, jonka jälkeen rakenteeseen ei ole saanut muodostua halkeamia, murtumia tai muita vaurioita, jotka vaikuttavat oven toimintaan. Lisäksi kestävyystestin jälkeen oven välkykset mitataan uudestaan ja niiden tulee säilyä elementille asetettujen toleranssirajojen sisällä. Kestävyystestin syklimäärä määräytyy oletetun käytön mukaan ja se vaihtelee välillä 0-200 000 toistoa. Esimerkiksi normaalisti kiinni olevien ovien, joita kuitenkin käytetään useasti, mutta lisäksi huolletaan tietyin väliajoin, kestävyystestin syklimäärä on joko 50 000 tai 100 000 toistoa tulkinnasta riipuen. [6]

Oven suljinlaitteistoa käytettäessä mitataan vielä ennen testauksen aloittamista suljinlaitteiston tuottama sulkuvoima, jolla laite pitää ovea kiinniasennossa. Tämän mittauksen avulla varmistetaan, että suljinlaitteiston kehittämä voima vastaa käytännön tilannetta, eikä sen avulla pyritä vain parantamaan polttotestauksessa olevan testielementin suorituskykyä. Lisäksi viimeinen oven tai ovien sulkeminen ennen polttotestauksen aloittamista tulee toteuttaa pelkästään suljinlaitteiston avulla ilman ulkoista voimaa, jolloin myös oven kiinniasennon tiiviys vastaa mahdollisimman totuudenmukaisesti käytännön tilannetta. [5]

2.3.3 Polttotestauksen suoritus ja testiraportti

Kaikki työssä esille tulleet standardit ja määräykset ovat muodostetut siten, että niitä pystytään soveltamaan kaikille palo-oville, oven valmistusmateriaalista riippumatta. Koska eri palo-ovimateriaaleilla (puu, teräs ja alumiini) ovat jonkin verran toisistaan poikkeavat rakenteet ja ominaisuudet, pyritään tässä luvussa keskittymään pääasiallisesti työn kohteena olevien alumiinisten palo-ovien kohdalla esiin nouseviin polttotestauk-

sen erityispiirteisiin. Seuraavaksi esiteltävien asioiden periaate ei varsinaisesti muutu eri valmistusmateriaaleilla, vaan ainoastaan niiden sovellustavat, joilla asioita tulkitaan.

Polttotestauksen aikana suoritettavat havainnot ja toiminnot määräytyvät sen mukaan mitä luokitusta kyseiselle elementille haetaan. Yhteistä kaikille havainnoille on se, että jokaisen havainnon tapahtuma-aika sekä -kohta kirjataan tarkasti ylös polttotestin pöytäkirjoihin. Testiraporttiin taas kirjataan kaikki asiat lähtien testissä käytetyistä standardeista sekä testatun elementin verifioimisesta ja mittauksista, päätyen aina testissä ilmenneisiin havaintoihin sekä itse testitulokseen ja luokituspäätökseen.

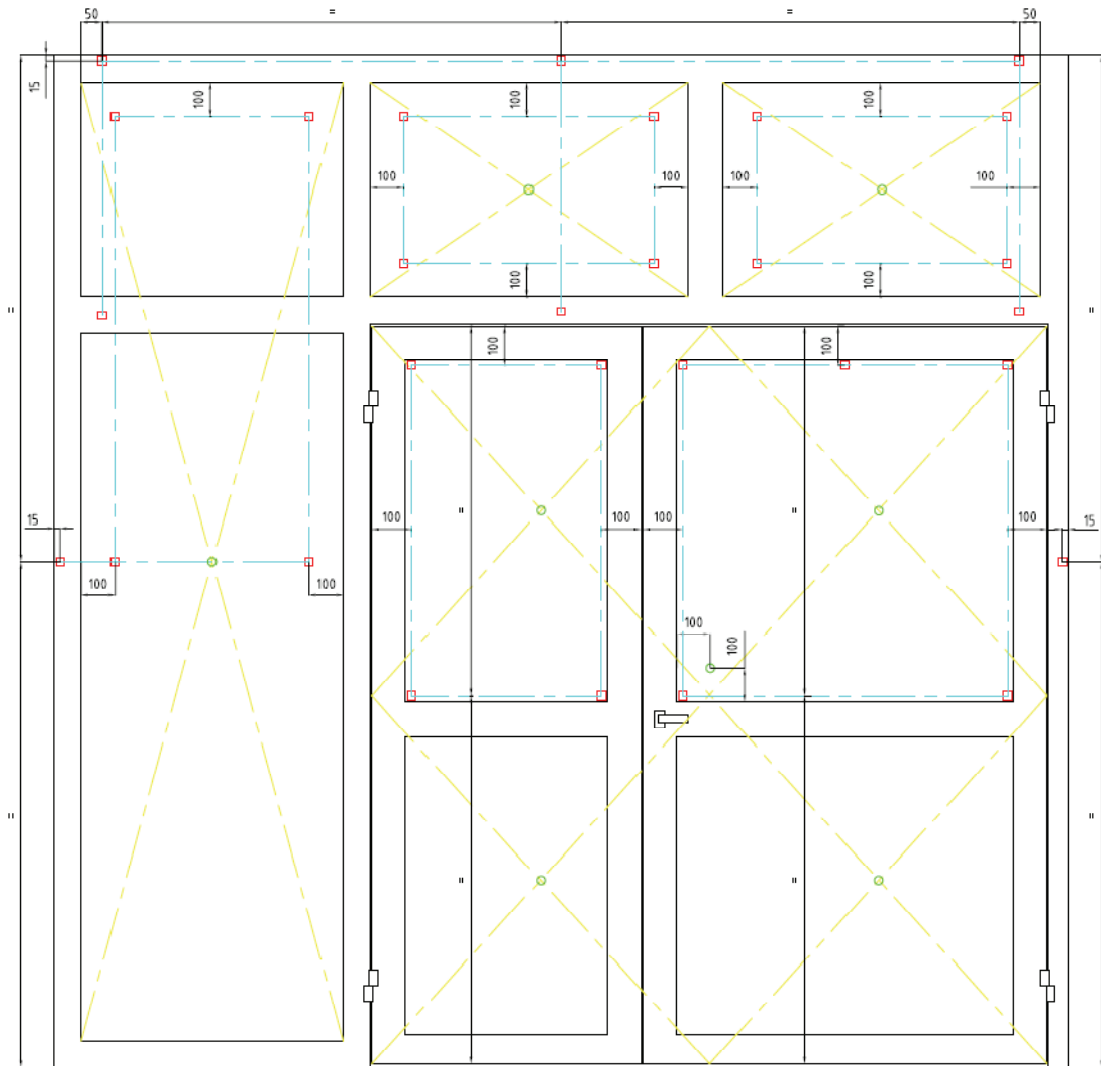
Tiiviysluokitusta (E) varten seurataan ainoastaan testattavaan elementtiin mahdollisesti syntyvien rakojen ja aukkojen muodostumista aiemmin testauslaitteiston yhteydessä mainittujen pumpulitukon ja rakotulkkien avulla. Lisäksi tarkastellaan, että elementin kylmälle puolelle ei synny jatkuvakestoisia liekkejä. Rakotulkkien käytössä standardi SFS-EN 1634-1 tarkentaa, että 6 mm:n rakotulkkia ei käytetä lattiatasossa, kuten kynnyksraon mittauksessa, vaan tällaisessa paikassa hyödynnetään ainoastaan 25 mm:n rakotulkkia.

Testielementin eristävyyttä (I) seurattaessa tärkeimmät havainnot tehdään lämpötila-antureiden avulla, jotka ovat kiinnitetty testattavan elementin kylmän puolen pintaan. Ovien ja ikkunoiden eristävyyskriteerien I_1 ja I_2 kohdalla anturien paikat eroavat hieman toisistaan. Yleensä testattavaan elementtiin kiinnitetään molempien edellä mainittujen luokitusten anturit, mutta testiraporttia kirjoitettaessa tulkitaan niistä vain tarvittavia antureita. Eristävyysluokituksen kohdalla on hyvä muistaa myös se, että testattavan elementin tiiviyskriteerien pettäessä seurauksena on testielementin hylkäys lisäksi eristävyyskohdalla.

Keskimääräistä lämpötilannousua mitattaessa asetetaan ovilehteen tai parioveen yhteensä viisi lämpötila-anturia. Lisäksi pinta-alaltaan yli neliömetrin suuruiseen lasitettuun tai umpiosilla varustettuun sivu- ja/tai yläpieleen kiinnitetään ylimääräisiä keskilämpötilaa mittaavia antureita. Keskimääräinen lämpötilannousu elementissä määritellään näiden anturien lukemien keskiarvona, joka ei saa nousta luokitusstandardissa ilmoitettua arvoa korkeammaksi. Maksimaalista lämpötilannousua mitataan kaikkien keskilämpötila-antureiden lisäksi ylimääräisillä, pelkästään maksimilämpötilannousua mittaavilla antureilla standardissa mainittujen ohjeiden mukaisesti. Maksimaalisessa lämpötilannousussa ei lasketa keskimääräistä arvoa, vaan jokaisen anturin mittaustuloksen tulee pysyä luokitusstandardissa määrättyjen rajojen alapuolella. Kuvassa 2.6 on esitetty sekä keskimääräistä että maksimaalista lämpötilannousua mittaavien anturien sijainnit esimerkkielementissä, kun testattavaan elementtiin on sijoitettu pelkästään oven I_2 luokituksessa tarvittavat lämpötila-anturit. [5]

Eristävyyskriteerien keskilämpötila-anturit sijoitetaan ovilehtien tapauksessa keskelle koko ovilehteä tai parioven muodostamaa kokonaisuutta sekä jokaisen ovilehden tai parioven neljänneksen keskelle. Kaikki edellä mainituista antureista täytyy olla vähintään 50 mm etäisyydellä kaikista liitoskohdista, jäykisteistä sekä koko elementin läpi menevistä osista. Lisäksi yksikään keskilämpötila-anturi ei saa olla 100 mm lähempänä ovilehden profiilien reunoja. Jos sivu- tai yläpielessä on pinta-alaltaan yli neliö-

metrin suuruinen lasitettu tai umpiosaksi tehty rakenne, tulee siihen kiinnittää edellä mainittuja ohjeita noudattaen ylimääräisiä keskilämpötila-antureita. Lisäksi, jos lasitetuihin aukkoihin ja umpiosiin on käytetty erilaisia rakennratkaisuja kuin muualla rakenteessa, tulee niitä tarkastella erikseen. Muussa tapauksessa samantyyppiset rakenteet yhdistetään yhdeksi isommaksi tarkastelualueeksi, kuten kuvan 2.6 esimerkkielementin sivupielen kanssa on menetelty. [5]



Kuva 2.6. Anturien sijoittelu elementissä, kun testataan I₂ luokituksen mukaista pariovea, jossa on sivu- ja yläpieli. Vihreät renkaat ovat keskilämpötilannousua ja punaiset neliöt maksimaalista lämpötilannousua mittaavia antureita.

Testattavan elementin ympäryskarmin eli karmiin, joka asennetaan uunin kiinnityskehään, asennetaan maksimilämpötilannousua mittaavia antureita kolmeen eri kohtaan; korkeussuunnassa jokaisen pystyprofiilin keskelle sekä leveyssuunnassa ylävaaka-profiilin keskelle ja 50 mm päähän kummastakin pysty- ja vaakaprofiilin liitoskohdan nurkasta. Lisäksi jokaiseen vaakaprofiiliin, joka on koko testielementin levyinen, kiinnitetään maksimilämpötila-anturit vastaavalla tavalla kuin edellä eli leveyssuunnassa keskelle sekä 50 mm päähän vaaka- ja pystyprofiilin liitoskohdasta. Edellä mainitut anturit kiinnitetään 15 mm etäisyydelle ympäryskarmin ja uunin kiinnityskehän yhtymiskohdasta. Kyseinen etäisyys täytyy kuitenkin olla alle 100 mm karmiprofiilin näkyvän osan

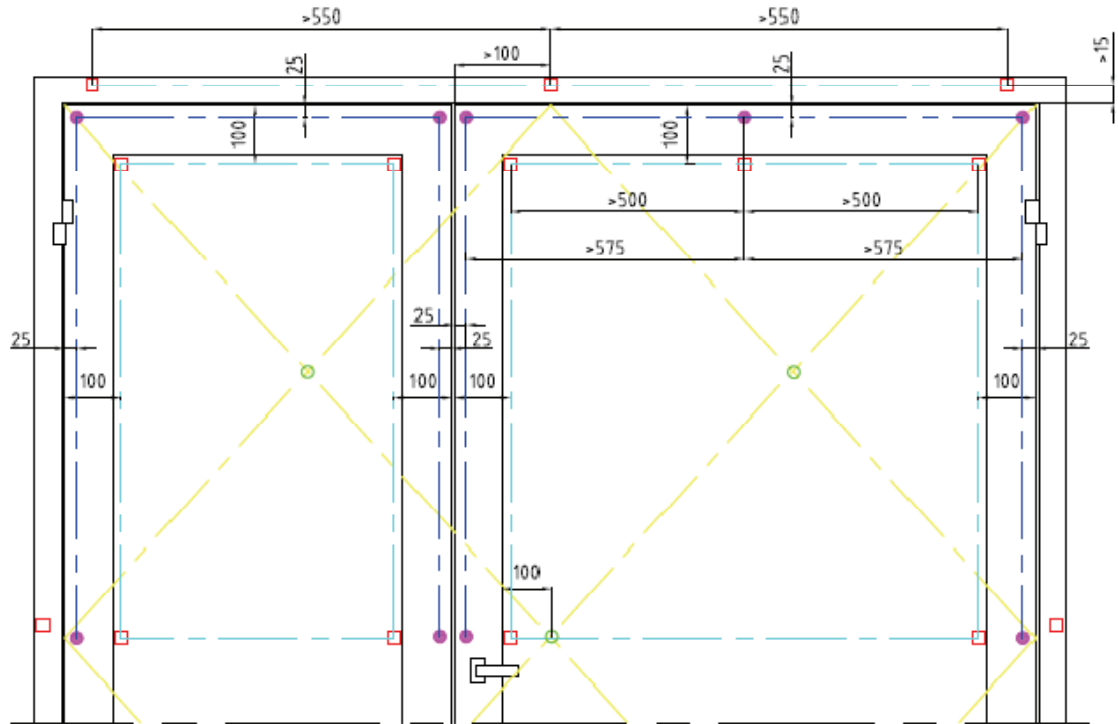
sisäreunasta katsottuna. Alle 30 mm leveisiin ympäryskarmi- tai vaakaprofiileihin ei kuitenkaan kiinnitetä antureita ollenkaan. Lisäksi anturien tulee olla vähintään 100 mm päässä pariovien välisestä pystysuuntaisesta liitoskohdasta. [5]

Ovilehteen ja parioveen kiinnitetään maksimilämpötila-antureita pystyprofiilien keskelle korkeussuunnassa ja ylävaakaprofiilin keskelle vaakasuunnassa, 100 mm päähän ovilehden näkyvästä reunasta sisäänpäin. Lisäksi ovilehtien ylänurkkiin asennetaan maksimilämpötila-anturit 100 mm etäisyydelle sekä vaaka- että pystysuuntaisesta ovilehden näkyvästä reunasta sisäänpäin. 115 mm leveillä ovilehden profiileilla anturit kiinnitetään suoraan profiilin pintaan 100 mm etäisyydelle näkyvästä reunasta. Jos ovilehden profiilin leveys on välillä 85–115 mm, asennetaan anturit lasin tai umpiosan pintaan, kuitenkin mahdollisimman lähelle ovilehden profiilin reunaa. Alle 85 mm leveillä ovilehtiprofiileilla anturit laitetaan 100 mm päähän ovilehden profiilin näkyvästä reunasta. [5]

Kuten keskimääräisen lämpötilannousun suhteen, myös maksimaalisen lämpötilan kohdalla sivu- ja yläpieliin tulee lisätä ylimääräisiä antureita, mutta maksimilämpötilannousun tapauksessa sivu- ja yläpielen pinta-alan koolla ei ole väliä. Lämpötila-anturit asennetaan vastaavalla tavalla kuin ovilehtien tapauksessa eli pystyprofiilien keskelle 100 mm päähän karmiprofiilin näkyvästä reunasta sekä elementin ylänurkkiin 100 mm etäisyydelle pysty- ja vaakasuuntaisesta karmiprofiilin reunasta. [5]

Ovien ja ikkunoiden eristävyyttä luokituksen I₁ mukaisesti testattaessa, edellä määriteltujen anturien sijoituspaikkojen lisäksi, asennetaan testattavaan elementtiin vielä lisää maksimaalista lämpötilannousua mittaavia antureita. Esimerkkikuvaan 2.7 on lisätty kyseiset ylimääräiset lämpötila-anturit parioven tapauksessa. Nämä täydentävät anturit sijoitetaan 25 mm päähän ovilehtien sekä sivu- ja yläpielien profiilien näkyvästä reunasta sekä pystyprofiilien pituussuunnan keskelle että ylävaakaprofiilin leveyssuunnan keskelle. Lisäksi ovilehtien sekä sivu- ja yläpielien nurkkiin kiinnitetään anturit 25 mm etäisyydelle pysty- ja vaakasuuntaisista profiilien näkyvistä reunoista. Yli 40 mm leveillä profiileilla anturit kiinnitetään profiiliin 25 mm päähän profiilin ulkoreunasta, 10–40 mm leveillä profiileilla anturit asennetaan lasiin tai umpiosaan mahdollisimman lähelle profiilia sekä alle 10 mm leveillä profiileilla anturin sijoitus tapahtuu lasiin tai umpiosaan 25 mm päähän profiilin näkyvästä reunasta. [5]

Ovilehden tapauksessa kolmesta anturista keskimäinen poistetaan kokonaan, jos maksimilämpötila-anturit tulevat vaakasuunnassa tarkasteltuna alle 500 mm etäisyydelle toisistaan. Sivu- ja yläpielien kohdalla maksimilämpötila-anturit eivät saa tulla vaakasuunnassa 100 mm lähemmäksi toisiaan. Pystysuunnassa katseltuna sivu- ja yläpielen maksimilämpötila-anturit pitää asettaa vähintään 100 mm etäisyydelle toisistaan, kun antureita on kaksi ja vähintään 300 mm päähän toisistaan, kun antureita on kolme peräkkäin. Kyseisiä anturien poistamisohjeita sovelletaan kaikille maksimaalista lämpötilaa mittaaville antureille luokituksesta riippumatta. [5]



Kuva 2.7. Luokituksen I₁ yhteydessä tarvittavat ylimääräiset lämpötila-anturit (purppuran väriset pallot) parioiven tapauksessa. Lisäksi kuvassa on esitetty anturien sijoittamisille mitta-aitoja, joiden alittuessa osa antureista poistetaan.

Kantavien rakenteiden polttotestauksessa tulee seurata elementin taipumaa koko testijakson ajan, sillä maksimitaipumalle on määritelty luokitusstandardissa yläraja. Vaikka kantamattomilla rakenteilla elementin taipuminen ei ole varsinainen luokituksen hylkäämisperuste, tehdään myös näillä elementeillä havaintoja ja mittauksia niiden taipumishistoriasta testin aikana. Standardissa SFS-EN 1634-1 on esitetty valistuneita arvioita, missä kohdissa suurimmat taipumiset elementeissä todennäköisesti tapahtuvat. Testin aikana tuleekin vähintään näitä kohtia seurata taipumisen suhteen, mutta myös muiden elementinosien taipuminen tulee taltioda testin pöytäkirjoihin, jos niissä havaitaan testin aikana voimakasta taipumista. Standardissa mainittuihin taipumisen suhteen seurattaviin kohtiin kuuluu ovilehden taipuminen karmiinsa nähden, pariovien taipuminen toistensa suhteen, karmirakenteen taipuminen tukirakenteeseen verrattuna sekä kevytrakenteisen kiinnityskehän taipuminen testin aikana. [5]

Olennaisia polttotestin aikana seurattavia asioita ovat myös uunin sisäisen paineen muodostus sekä testattavan elementin kylmän puolen lähettämän säteilytehon mittaaminen. Uunin sisäiselle paineelle on asetettu rajat, joita se ei saa ylittää eikä alittaa, joten uunin sisäistä painetta säädellään testijakson aikana aina tarpeen mukaan. Elementin kylmän puolen säteilytehonmittaus suoritetaan siihen soveltuvalla mittarilla, joka asetetaan 1,5 m päähän testattavasta elementistä. Säteilytehon mittaussyklin tiheys määräytyy elementin heikkenemistahdin mukaisesti tai muuten soveltuvaksi katsotun aikavälin määrittelemänä. Lämpösäteilyn voimakkuus ilmoitetaan tehona pinta-alan suhteen yksikössä W/m^2 .

Tyyppihyväksyntöjen kohdalla virallisen testiraportin ja sitä seuraavan luokituspäätöksen voi laatia ainoastaan ilmoitettu laitos. Testiraporttia varten suoritettavan polt-

testauksen taas voi ilmoitetun laitoksen lisäksi tehdä mikä tahansa taho, jolla on kaikki standardien mukaiset valmiudet testien suorittamiseen, ja jonka suorittamat testit ilmoitettu laitos hyväksyy tyyppihyväksyntöjen testiraporttia varten. Varsinaiseen testiraporttiin kootaan jäljennettävyyden takia paljon tietoa itse polttotestistä, polttotestin suorittajasta, testin tilaajasta, testielementin valmistajasta sekä kaikesta sellaisesta informaatiosta, jolla on tai edes epäillään olevan vaikutusta testin tuloksiin. Lisäksi testiraporttiin kerätään kaikki olennainen tieto tehdyistä valmisteluista, mittauksista ja havainnoista, joita aikaisemmin tässä luvussa on käsitelty. Erityisen tärkeää on mainita testiraportin yhteydessä kaikki standardit, joita testattavan elementin esivalmisteluissa sekä varsinaisessa testauksessa on sovellettu, jotta voidaan varmistua niistä kriteereistä, jonka mukaan testituloksia on testiraportissa arvioitu.

2.3.4 Testien suunnittelu ja testiraporttien soveltaminen

Edellytykset laajalle tuotevariaatiolle luodaan jo testien suunnitteluvaiheessa. Kun halutaan minimoida turhien polttotestien määrä, tulee ottaa huomioon erityisen tarkasti testiraporttien suorat ja laajennetut sovellusmahdollisuudet, sillä niiden avulla voidaan toteuttaa kattavasti elementtien eri koko- ja muotovaihtoehdot mahdollisimman vähäisellä testaustarpeella. Suoria ja laajennettuja sovellusmahdollisuuksia työn kohteena olevalle rakennusjärjestelmälle tarkastellaan omissa erillisissä luvuissaan jäljempänä. Testien kokonaisuutta ja elementtien rakennetta mietittäessä on hyvä lisäksi noteerata myös rakentamismääräyskokoelmassa mainitut kokovaatimukset tietyille osastoiville elementeille, jotta tehtävät testit kattaisivat nämäkin ehdot suoraan.

Rakentamismääräyskokoelmassa mainitaan, että osastoivien palo-ovien tulee olla itsestään sulkeutuvia ja salpautuvia. Lisäksi normaalisti auki olevien palo-ovien tulee sulkeutua automaattisesti tulipalon sattuessa. Polttotestauksen yhteydessä tulee siis testattava elementti varustaa kyseiset toiminnot mahdollistavilla laitteistoilla tai ainakin varmistaa, että tällaiset laitteistot voidaan oveen käytännössä lisätä tarpeen mukaan. Lisäksi rakentamismääräyskokoelmassa mainitaan, että palo-oven tulee olla poistumisuuntaan avautuva, jos palo-ovi on poistumistieksi merkityllä reitillä. Poistumistien leveyden tulee olla vähintään 1200 mm, joka kasvaa rakennuksen sallitun henkilömäärän kasvaessa tietyin syklivälein. Lisäksi poistumistien vapaan korkeuden tulee olla vähintään 2100 mm. Oven kohdalla poistumistien vähimmäismitoista saa vähentää välttämättömien oven karmirakenteiden leveyden ja kynnyksen korkeuden verran, joten näin ollen poistumisreitillä käytettävän palo-oven karmirakenteen ulkomittojen tulee täyttää edellä mainitut vähimmäismitat.

Rakentamismääräyskokoelman osassa F1 käsitellään julkisissa tiloissa käytettäviä kulkuteitä. Sen mukaan esteettömässä rakennuksessa ovien vapaan kulkuaukon leveyden tulee olla vähintään 850 mm, jotta kyseinen kulkuaukko soveltuu pyörätuolien käytettäväksi ilman vasikkaoven avaamista. Vapaalla kulkuaukolla tarkoitetaan todellista oviaukon vapaaksi jäävää leveyttä, joka mitataan avatun ovilehden uloimmasta kohdasta, kohtisuorana etäisyytenä, vastapuolen karmin uloimpaan pintaan. Asuinrakennusten ulko-ovien vapaan kulkuaukon minimileveys 800 mm määritellään taas rakentamis-

määräyskokoelman osassa G1. Edellä mainittuja leveyksiä voidaan pitää hyvinä alarajoina määriteltäessä yksittäisten ovien vähimmäisleveyksiä testien yhteydessä.

Polttotestauksesta saadut luokitukset ovat suoraan voimassa vain vastaavan kokonaisuuden muodostaville elementeille kuin mitä polttokokeessa todellisuudessa käytettiin. Elementeille sallitaan kuitenkin tietyt pienet muutokset, joiden vaikutukset palonsuojausominaisuuksiin on selkeästi pääteltävissä ja todettavissa merkityksettömiksi tai hyvin vähäisiksi. Lisäksi vuosien saatossa erilaisten polttokokeiden myötä kertyneiden testitulosten perusteella on voitu määritellä muutamia ylimääräisiä lisäehtoja testitulosten sallituille sovellusmahdollisuuksille. Edellä esiteltyjä muutoksia kutsutaan testiraportin suoriksi sovellusmahdollisuuksiksi (Field of direct application of test results), sillä niiden hyödyntämiseksi ei tarvitse tehdä lisätutkimuksia, ylimääräisiä laskelmia tai jatkotulkintoja. Testatuille elementeille sallitut suorat sovellusmahdollisuudet vaatimukseen ovat esitelty standardin SFS-EN 1634-1 lopussa kappaleessa 13. Lisäksi kyseisessä osiossa mainitaan myös kiellettyjä asioita ja muutoksia, joita ei saa vaihtaa tai korvata testattuun versioon nähden.

Testattuihin elementteihin on kuitenkin mahdollista tehdä hieman suurempia muutoksia, kun elementin testausvaiheessa täytetään sille asetetut tarkennetut ja tiukennetut vaatimukset. Lisäksi aikaisemmin testattujen erilaisten elementtien testiraporttien tietoja voidaan tietyissä rajoissa yhdistellä omaksi muunnelluksi testiraporttikseen. Näin ollen säästyään arvokkaalta polttotestauksen suoritukselta, kun muunnellulle elementille voidaan kirjoittaa oma luokitusraporttinsa pelkästään aikaisemmin toteutettuihin polttotestauksiin perustuen. Tällä tavoin elementeille saatavat laajennetut sovellusmahdollisuudet ovat esitetyt niin kutsutuissa EXAP-standardeissa (Extended application of test results). Standardeissa kerrotaan myös mitkä muutokset tarvitsevat lisätutkimuksia tai oman polttotestauksen, jotta ne voidaan hyväksyä sallittujen muutosten piiriin.

Palolta suojaaville rakennusjärjestelmille ei tämän työn kirjoittamisen aikana ole ilmestynyt kuin vasta muutama vahvistettu EXAP-standardi. Suurin osa näistä laajennettujen sovellusmahdollisuuksien standardeista on vielä luonnosteluvaiheessa tai siirtyneet odottamaan virallista hyväksyntää. Palo-ovien ja avattavien ikkunoiden kohdalla EXAP-standardista on ilmestynyt vuoden 2012 huhtikuussa luonnos esistandardista, joka ei siis vielä ole vahvistettu tai muutenkaan virallinen standardi tätä työtä kirjoitettaessa. Kyseiseen esistandardiin, prEN 15269-5, kuitenkin viitataan tämän työn pohjalta laajennettuja sovellusmahdollisuuksia tarkemmin tarkasteltaessa. On varsin oletettavaa, että mahdolliset muutokset tähän standardiin tulevat olemaan hyvin pieniä, kun kyseinen standardi vahvistetaan viralliseksi. Vahvistetun standardin aikana ilmestyessä on kuitenkin syytä tarkistaa tähän työhön kirjoitettujen asioiden totuudenmukaisuus laajennettujen sovellusmahdollisuuksien osalta.

2.3.5 Testiraporttien suorat sovellusmahdollisuudet

Tässä luvussa on kerätty standardista SFS-EN 1634-1 vain ne olennaiset kohdat testiraporttien suorista soveltamisohjeista, jotka luontevasti sisältyvät työn kohteena olevaan alumiiniseen rakennusjärjestelmään. Kyseinen standardi sisältää tässä luvussa mainittu-

jen asioiden ohella erikseen omat soveltamisohjeensa esimerkiksi liukuoville sekä pui-sille palo-oville, joiden kohdalla kaikkia tässä luvussa esitetyjä ohjeita ei voida sovel-taa.

Standardissa mainittujen suorien sovellusmahdollisuuksien mukaan metallista valmistetun kehämateriaalin seinämävahvuutta voidaan kasvattaa enintään 25 %, mutta esimerkiksi käytettyä metallityyppiä ei saa vaihtaa toiseen millään tavalla. Testattuun elementtiin voidaan lisätä siinä käytettyjen jäykisteiden sekä seinäkiinnikkeiden määrää, mutta niiden määrää ei saa vähentää eikä niiden etäisyyttä toisiinsa nähden kasvattaa. Testattua elementtiä ei voida kiinnittää lämpöeristettyjen metallikarmien tapauksessa muunlaiseen tukirakenteeseen kuin missä se on alun perin testattu. Näin ollen elementti tulee testata erikseen sekä jäykässä että taipuisassa tukirakenteessa. Jäykkä tukirakenne voi kuitenkin olla tiheydeltään ja paksuudeltaan joko samaa luokkaa tai suurempaa kuin mitä se oli testeissä. Myös taipuisan tukirakenteen osalta riittää, että käytettävän tukira-kenteen erillinen paloluokitus on vastaava tai parempi kuin mitä testeissä käytettiin. [5]

Lasien ja umpiosien kiinnitystapaa tai kiinnikkeiden määrää ei saa suorien testi-raportin sovellusohjeiden mukaan muuttaa testatusta, eikä lasitettujen aukkojen määrää tai lasiruutujen kokoa saa kasvattaa. Lasiruutujen kokoa on kuitenkin mahdollisuus pie-nentää samassa suhteessa ovilehden pienennyksen kanssa tai muussa tapauksessa mak-simissaan 25 %. Lisäksi lasiruutujen kokoa voidaan pienentää rajatta, jos kyseinen lasi on kattanut alle 15 % koko testatun ovilehden tai ylä- ja/tai sivupielen alasta. Myös lasi-en reunojen ja niitä ympäröivien kehärakenteiden välyksiä ja mittasuhteita toisiinsa nähden ei saa muuttaa testeissä käytetyistä. [5]

Ovilehtien sekä sivu- ja yläpielien koon muuttamiseen suoria sovellusohjeita noudatettaessa vaikuttaa testatun elementin saavuttama aika, josta se suoriutuu luokitus-vaatimusten rikkoutumatta. Kategoriaan A kuuluu ne elementit, jotka juuri ja juuri to-teuttavat vaaditun palonkestävyyssajan, esimerkiksi 60 minuuttia. Kategorian A lämpö-eristettyjä metalliprofiileista valmistettujen ovilehtien leveyttä voidaan pienentää 50 % testatusta ja korkeutta 75 %, mutta ovilehden kokoa ei saa kasvattaa testiin verrattuna. [5]

Kategoriaan B taas pääsevät ne elementit, jotka kykenevät täyttämään luokitus-vaatimukset erikseen määritellyn, pidennetyn ajanjakson verran, esimerkiksi palonkes-tävyyssajaluokituksen 60 tapauksessa 68 minuuttia. Pidennetyn testausajan lisäksi testa-tussa elementissä tulee olla ovilehtien ja sen karmien välyksiksi asetettu välysten kes-kiarvon ja maksimin välistä oleva arvo, kuten aikaisemmin testielementin esivalmiste-luiden yhteydessä välyksistä mainittiin. Välyshedot täyttävää, lämpöeristettyä metalli-runkoista ovilehteä sekä sen ylä- ja sivupieliä voidaan pienentää leveyden suhteen 50 % ja korkeuden suhteen 75 %. [5]

Pidennetyn testijakson ja oikeilla välyksillä testatun ovilehden kokoa voidaan myös kasvattaa; leveyttä 15 %, korkeutta 15 % tai ovilehden kokonaisalaa yhteensä 20 %. Testiuunin rajallisesta leveydestä johtuen suorat sovellusohjeet sallivat lisäksi testa-tun kokoisen sivupielen lisäämisen oviaukon toiselle puolelle saman levyisenä. Jos yli-määräinen sivupieli lisätään yksittäisen oven yhteyteen, tulee se testissä asettaa lukko-

rungon puoleiselle reunalle. Ovilehtien tai pielien koon kasvattaminen sekä sivupieliin lisääminen ei kuitenkaan ole sallittua EW-luokituksen saaneelle elementille. EW-luokituksen saaneissa rakenteissa käytetään yleensä palossa reagoimattomia laseja, jotka pysyvät kirkkaina koko testausjakson ajan ja ovat huonoja lämmöneristäviä. Rakenteen koon kasvattaminen tarkoittaa taas käytännössä lasien tai umpiosien koon kasvattamista, jolloin oletettavasti elementin läpi pääsevän säteilyn määrä lisääntyy elementin koon suurentuessa, sillä heikosti lämpöä eristävien lasien pinta-ala suhteessa muuhun rakenteeseen kasvaa. [5]

Suorat sovellusohjeet testiraporteille sallivat maalipinnoitteiden lisäämisen sekä vaihtamisen vastaavaan pintakäsittelyyn, kunhan pinnoitteella ei ole vaikutusta elementin palonkestävyyteen. Ovien lukkojen, lukitussalpojen, varmistustappien sekä saranoiden määrää saadaan kasvattaa ovelle, mutta helojen vaihtamista toiseen vastaavaan ei ole sisällytetty suorien sovellusohjeiden pariin. Saranoiden kohdalla on määritelty, että niiden sijaintia voidaan siirtää lähemmäksi ovilehden nurkkia, mutta ei kauemmaksi nurkista. Lisäksi kolmen saranan tapauksessa keskimmäisen ja alimmaisen saranan etäisyys toisistaan tulee säilyä samana tai etäisyyttä voidaan kasvattaa, mutta ei pienentää. Lukkoja ja lukitussalpoja voidaan taas siirtää testatusta korkeudesta ylöspäin, mutta ei yhtään alaspäin. Lisäksi elementissä testattu ovensuljin, jonka suljintoiminto ei ole ollut testin aikana käytössä, voidaan joko pitää elementissä tai myös poistaa se, jos suljinta ei ovelle haluta käyttää ollenkaan. [5]

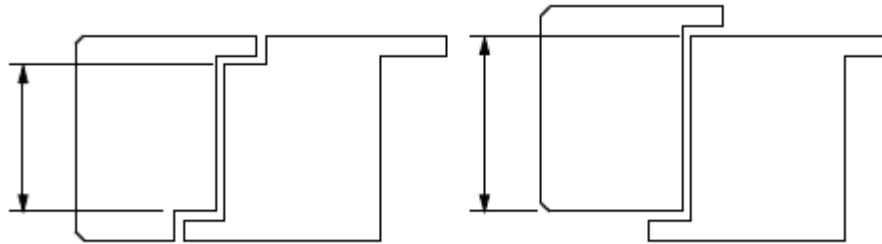
Suorissa sovellusohjeissa mainitaan, että jos testattu elementti on täysin symmetrinen kaikkien poikkileikkaustensa suhteen sekä elementissä on käytetty joko pelkästään yli 1000 °C sulamispisteen omaavia heloituksia tai helat on testattu aikaisemmin jonkin muun testielementin yhteydessä onnistuneesti, voidaan testattavalle elementille saada luokitus molemminpuoliselle palolle vain toispuoleisella poltolla. Jos taas rakenne ei ole symmetrinen, eikä siitä voida yksiselitteisesti päätellä heikommin testissä käyttäytyvää puolta, tulee elementti testata molemmin puolin, jotta sille voidaan myöntää luokitus palon suunnasta riippumatta. [5]

2.3.6 Testiraporttien laajennetut sovellusmahdollisuudet

EXAP-standardissa prEN 15269-5 käsitellään kaikkia saranoituja metallikehyksellä varustettuja lasiovia sekä avautuvia ikkunoita. Tämän luvun sisällöstä on karsittu pois työn kannalta epäolennaisina asioina katsotut kohdat, joita ei kehitettävänä olevan rakennusjärjestelmän kohdalla pystytä hyödyntämään tai soveltamaan. Täydentävän tiedon ja tässä luvussa mainitsemattomien asioiden kohdalla edellä mainittuun standardiin syventyminen on äärimmäisen suositeltavaa ja tärkeää. Tässä luvussa tullaan myös viittaamaan useasti ”aiempiin testauksiin”, joilla tarkoitetaan testiä, joka on tehty joko standardin SFS-EN 1634-1 mukaisesti täysikokoiselle elementille tai standardin SFS-EN 1634-2 määrittelemälle pienempikokoiselle elementille.

Ovilehdille on määritelty kaksi tarkasteltavaa ehtoa, joiden toteutuminen vaaditaan monen laajennetun soveltamisohjeen kohdalla. Ensimmäinen ehdoista on jo suorissa sovellusohjeissa määritelty pidennetty testijakso, kategoria B. Toinen ehto taas liittyy

ovenkarmin ja ovilehden keskinäiseen liikkeeseen syvyyssuunnassa testijakson aikana lämpölaajenemisesta johtuvan elementin taipumisen ja rakennemuutosten liikkeen takia. Tätä liikettä varten on määritelty termi tehollinen kyntetilan syvyys, jonka mittaamista on havainnollistettu kuvassa 2.8. Testin aikana tapahtuvan elementin taipumisesta johtuva ovilehden ja karmin limittäisyys on jaettu kolmeen eri ryhmään. Limittäisyyden katsotaan olevan vähäistä, kun ovilehden ja karmin suhteellinen liike on alle 40 % tehollisesta kyntetilan syvyydestä. Jos limittäisyys on välillä 40–60 % suhteessa teholliseen kyntetilan syvyyteen, on se tällöin keskimääräistä. Suuri limittäisyys taas ilmenee, kun suhteellinen liike on yli 60 % tehollisesta kyntetilan syvyydestä.



Kuva 2.8. Ovilehden ja karmin välisen tehollisen kyntetilan syvyyden mittaaminen. [8]

Laajennettujen soveltamisohjeiden mukaan yksittäinen ovilehti ja pariovi tulee testata erikseen, sillä kummankaan testin tuloksia ei voida selkein perustein laajentaa kattamaan toista vaihtoehtoa. Ovilehden korkeutta ja leveyttä voidaan kasvattaa kumpaakin enintään 20 % alkuperäisestä, mutta ovilehden kokonaispinta-ala ei kuitenkaan saa kasvaa yli 21 % testatusta. Lisäksi ovilehden kasvattamisen ehtoina on kategorian B testausajan täyttyminen sekä ovilehden ja karmin keskimääräinen tai pieni kyntetilan limittäisyys testien aikana. Ovilehteä voidaan myös pienentää lasien sallittuun minimikokoon asti, jonka tulee vähintään olla 250 x 250 mm. [8]

Ovilehdessä käytettyjen profiilien kokoa saa kasvattaa leveyssuuntaan 100 %, mutta kuitenkin maksimissaan 120 mm leveäksi, sekä syvyyssuuntaan 25 %, kunhan pieni tai keskimääräinen ovilehden ja karmin limittäisyyssehto toteutuu. Syvyyssuunnassa profiilien pienennys ei ole sallittua, sekä leveyssuunnassakin pienennys saa olla alle 115 mm leveillä profileilla enintään 40 % aina 30 mm minimileveyteen asti. Profiilien seinämävahvuutta ei saa pienentää, mutta niitä voidaan halutessa kasvattaa 0,5 mm, kuitenkin ylittämättä 2 mm maksimiseinämävahvuutta. Ovilehden ja sen karmien tapauksessa myös huullokien poistaminen tai niiden lisääminen ei pääasiallisesti ole sallittua. Ovilehtien alapuolella oleva kynnyks voidaan poistaa tai lisätä, kunhan ovilehden ja varsinaisen lattiatason välis pysyvy muuttumattomana. [8]

Välivaakojen ja -pystyjen siirtäminen ovilehdessä on mahdollista, samoin kuin niiden lisääminen ovilehteen. Edellytyksenä kuitenkin on, että vastaava välivaaka tai -pysty on testattu ovilehden yhteydessä aikaisemmassa polttotestissä onnistuneesti. Välivaakojen ja -pystyjen poistaminen on sallittua vain silloin, kun poistetun profiilin kohdalla lasin tai umpiosan koko ei kasva suurinta ovilehdessä testattua lasin kokoa suuremmaksi. Lisäksi välipystyjen kohdalle on asetettu lisäehto, että niitä ei saa siirtää kauemmaksi saranapuolen pystyprofiilista katsottuna. [8]

Elementin ympäryskarmia käsitellään omana kokonaisuutena laajennetuissa sovellusohjeissa. Ympäryskarmiksi lasketaan se osa elementistä, joka kiinnittyy tukirakenteeseen. Ympäryskarmin kohdalla profiilien leveyttä ja syvyyttä voidaan kasvattaa, jos ympäryskarmin huullos pysyy liikkumattomana ovilehden tai sivupielen profiileihin nähden. Ympäryskarmin profiilien leveyden tai syvyyden pienentäminen ei tosin ole sallittua. Ympäryskarmin yhteydessä voi olla myös niin sanottuja ylimääräisiä profiileita, joilla esimerkiksi on kasvatettu karmin kokonaisleveyttä. Tällaisia ylimääräisiä profiileita voidaan rakenteesta poistaa kategorian B täytyessä, mutta niitä ei saa lisätä elementteihin ilman testausta. Ylimääräisten profiilien kohdalla leveyttä voidaan kasvattaa 100 % aina 50 mm asti ja pienentää rajatta, jos kategorian B testiaika on saavutettu. [8]

Sivu- ja yläpielien osalta profiilien leveyttä pystytään kasvattamaan jopa 300 % maksimileveyteen 300 mm saakka, paitsi ovenkarmin profiileita, joiden leveyttä saa kasvattaa 100 % aina 120 mm asti, mutta vain siinä tapauksessa, että kategorian B aikaraja saavutetaan sekä karmin lämpötilan nousu ei testissä ole yli 180 °C. Leveyden pienentäminen on profiileissa sallittu 40 % minimiin 30 mm asti. Profiilien syvyyttä voidaan kasvattaa 25 %, mutta syvyyttä ei saa pienentää. Lisäksi profiilien seinämävahvuutta saadaan kasvattaa 0,5 mm, mutta ei ohentaa. [8]

Vastaavalla tavalla kuin ovilehtien tapauksessa, niin myös sivu- ja yläpieliin saa lisätä välivaakoja ja -pystyjä, jos sellainen on testattu aikaisemmassa testissä onnistunein tuloksin. Sivupieleen ei kuitenkaan saa lisätä kuin korkeintaan kolme välivaakaa ja yhden välipystyn sillä ehdolla, että profiililisäyksen jälkeen lasien korkeus ja leveys eivät alita pienimmän sallitun lasin mittoja (250 x 250 mm), sekä lisäksi lasien korkeus on vähintään 20 % niiden leveydestä välivaakaa lisättäessä. Sivupielestä voidaan poistaa välivaakoja tai -pystyjä, jos poiston seurauksena lasin tai umpiosan koko ei ylitä suurimman testatun lasin tai umpiosan mittoja ja välivaaka on testatussa elementissä sijainnut sivupielen alemmassa puoliskossa. Jos kaikki sivupielen yhteydessä mainituista ehdoista lasien koon suhteen toteutuvat, voidaan myös välivaakoja ja -pystyjä siirtää alkuperäisestä sijainnistaan toiseen. Sivupielen koon muuttaminen noudattelee samoja sääntöjä kuin ovilehti eli kategorian B elementeillä leveys- ja korkeussuunnassa kasvu saa olla 20 % ja pinta-alan suhteen maksimissaan 21 %. Sivupielen pienentäminen taas määräytyy lasien pienimmän sallitun koon mukaan. [8]

Yläpielelle asetetut ehdot ovat vastaavanlaiset kuin sivupielen tapauksessa eli välivaakoja ja -pystyjä saa lisätä siinä tapauksessa, että sellainen on testattu aikaisemmin jonkin elementin yhteydessä. Yläpieleen saa lisätä enintään kolme välipystyä ja yhden tai useamman välivaa'an sekä niitä saadaan siirrellä, kunhan minimilasin mitat eivät missään tapauksessa alitu ja välivaa'an lisäämisen tai siirtämisen jälkeen lasin korkeus on vähintään 20 % sen leveydestä. Yläpielestä voidaan poistaa välivaakoja siten, että lasin koko ei ylitä profiilin poistamisen jälkeen suurinta testattua lasin kokoa. Yläpielestä ei kuitenkaan voida poistaa välipystyjä, vaikka suurimman sallitun lasin koko ei ylittyisikään, vaan tällainen tapaus tulee testata omana elementtinään. Yläpielen koon muuttaminen seuraa samaa mallia kuin ovilehden ja sivupielen koon muuttamisenkin. [8]

Elementin aukoissa käytettäviä lasia voidaan vaihtaa tyypistä toiseen, kunhan huolehditaan, että vaihdettavan lasin paloluokitus pysyy samana tai luokitus paranee. Lisäksi vaihdettavalta lasilta vaaditaan, että se kuuluu samaan tuoteperheeseen eikä lasinkiinnitystavassa tapahdu muutoksia. Samaan tuoteperheeseen kuuluva palolasi voi olla paksuudeltaan erikokoinen, kunhan lasin kiinnitystapa muutetaan samalla paksuuteen nähden sopivaksi, eikä lasin kokonaispaino lisäännä yli 25 % alkuperäisestä. Eri palolasien valmistajien tuotteita voidaan vaihtaa keskenään, jos vaihdettava lasi on erikseen määriteltujen tuotestandardien mukainen sekä saman tai paremman paloluokituksen saanut lasi. [8]

Laseille määritelty pienin koko on 250 x 250 mm, johon asti testeissä käytettyjä lasia voidaan pienentää. Lasin kokoa voidaan kasvattaa kategorian B ehtojen täyttyessä leveys- ja korkeussuunnassa enintään 20 % ja kokonaisalan suhteen korkeintaan 21 %. Lasiruudun kokoa kasvattaessa, sitä ympäröivän karmirakenteen tulee kuitenkin kasvaa samassa suhteessa, eikä lasin ja karmin reunojen etäisyys saa pienentyä. [8]

Lasituslistojen syvyysmittaa voidaan vaihtaa lasin paksuuden mukaan sopivaksi siinä tapauksessa, että lasituslistojen sisään mahdollisesti laitetut täytemateriaalit ja turpoavat tiivisteet pysyvät muuttumattomina. Lasituslistojen korkeutta ei kuitenkaan saa muuttaa testatusta. Lasituksessa käytettävien asennustiivisteiden koko saa muuttua lasipaksuudelle sopivaksi, kunhan muutoksen myötä tiivisteiden koko ei pienene yli 50 % tai toisaalta kasva yli 20 % alkuperäisestä. [8]

Palolasien tilalla voidaan käyttää myös umpiosia, joille pätevät soveltuvin osin samat laajennusehdot kuin palolaseille. Umpiosille on lisäksi erikseen määritelty, että ovilehden alaosassa käytettäessä, umpiosa voidaan tehdä 250 mm sijaan minimissään 200 mm korkeana osana. Umpiosan paksuus voi kasvaa maksimissaan 25 % testatusta, mutta testattua umpiosaa ei saa ohentaa. Umpiosan päälle voidaan lisätä esimerkiksi alumiinista tai teräksestä tehty päällyspelti, jos umpiosa on testattu ilman päällyspeltiä. Jos taas testeissä on käytetty päällyspeltiä umpiosan päällä, voidaan päällyspellin paksuutta ohentaa 25 %, kuitenkin minimissään 0,5 mm vahvaksi. Myös päällyspellin materiaalin vaihto onnistuu ruostumattomasta teräksestä tavalliseen teräkseen ja teräksestä alumiiniin ilman erillistä testausta. Umpiosa voidaan myös poistaa kokonaan, kun umpiosan vieressä olleen ja poiston myötä suurentuvan aukon lasin koko ei ylitä suurimman testatun lasin kokoa. [8]

Metallirunkoisten lämpöeristettyjen testielementtien kohdalla tulee jokainen tukirungoksi ajateltu rakenne testata erikseen, sillä on oletettavissa, että metallirunkoinen elementti käyttäytyy huomattavan paljon eri tavalla jäykässä tukirungossa kuin joustavaan rakenteeseen kiinnitettynä. Testattavan elementin kiinnitys tukirakenteeseen tapahtuu soveltuvalla tavalla rakenteiden materiaalit huomioon ottaen. Elementin kiinnitystapaa voidaan vaihtaa tukirakenteelle ja elementille sopivien kiinnittimien välillä sekä myös kiinnittimien valmistajaa ja materiaalia saa vaihtaa, jos kiinnittimien sulamispiste on yli 850 °C tai jos kiinnitystapa on testattu onnistuneesti aiemmassa testissä. Kiinnitystapaa tärkeämmässä osassa on kiinnityskohtien etäisyys toisistaan, jota ei saa harvennata testatusta, mutta kiinnityskohtien määrää voidaan kuitenkin lisätä ja lisäksi kiinnit-

timien kokoa kasvattaa. Kiinnityskohtien etäisyyttä toisistaan voidaan kasvattaa korkeintaan 15 % vain siinä tapauksessa, että elementin kokoa kasvatetaan laajennettujen sovellusohjeiden mukaisesti, ja tällöinkin kiinnittimien etäisyys saa kasvaa vain samassa suhteessa elementin kokonaiskasvuun nähden. [8]

Ovien ja ikkunoiden yhteydessä käytetään sekä lämmön vaikutuksesta turpoavia tiivisteitä että tavallisia kumitiivisteitä. Näistä turpoavat tiivisteet ovat kaikista kriittisimpiä palonsuojauksen kannalta eikä niiden paikkaa tai kokoa saa muuttaa testattuun elementtiin verrattuna. Turpoavien tiivisteiden materiaalikin voidaan vaihtaa vain identtiseen tuotteeseen. Kumitiivisteistä paloon osallistumattomat A1 luokan tiivisteet ovat myös tärkeässä osassa paloturvallisuutta. Kyseisten tiivisteiden sijaintia ei useimmissa tapauksissa saa muuttaa siitä, missä ne ovat polttotestin tapauksessa olleet. Niiden kokoa saadaan kuitenkin suurentaa, mutta ei pienentää testatusta. Myös paloon osallistumattomien tiivisteiden kohdalla korvaavan materiaalin tulee olla identtinen ominaisuuksiltaan alkuperäiseen verrattuna. Paloon jollakin tavalla osallistuvien, alle A1 luokkaa olevien, kumitiivisteiden kohdalla niiden materiaalia voidaan vaihtaa paremmin luokiteltuun tiivisteeseen. Toisaalta alle A1 luokan tiivisteitä ei saa elementtiin lisätä tai sieltä poistaa eikä myöskään niiden paikkaa saa siirtää testattuun elementtiin nähden. Palavien, alle A1 luokan tiivisteiden kokoa voidaan tarvittaessa pienentää, mutta niiden suurentaminen on kiellettyä. [8]

Elementin profiilien sisällä käytettävien täytemateriaalien osalta testiraporttien sovelluslaajennukset ovat hyvin selkeät. Toisin sanoen täytemateriaalit voidaan vaihtaa vain vastaavaan identtiseen tuotteeseen eikä täytemateriaalin kokoa saa pienentää testattuun versioon nähden. Täytemateriaalien kohdalla sallitaan ainoastaan paksuuden kasvattaminen sekä käytetyn aineen tiheyden suurentaminen. [8]

Jos profiilit ovat maalattu palonsuojauskykyä parantavilla maaleilla, ei pintakäsittelyä saa muuttaa, ohentaa tai poistaa. Palonsuojamaalin kerrospaksuutta voidaan kuitenkin kasvattaa maksimissaan 25 % alkuperäisestä sekä maali voidaan vaihtaa vastaavaan, ominaisuuksiltaan identtiseen tuotteeseen. Pintakäsittelyitä, joilla ei ole palolta suojaavaa ominaisuutta, saadaan lisätä profiileihin tai vaihtaa toiseen samanlaiseen maaliin. Myös muiden pinnoitteiden, kuten laminointien ja vanerointien lisääminen ja vaihtaminen on sallittua tietyin ehdoin. [8]

Helat ovat olennainen osa ovien rakennetta. Oviheloituksista lukkorunkojen, lukitussalpojen ja vastarautojen kohdalla vaihtaminen toiseen onnistuu, jos vaihtoehtoinen hela on testattu aiemmissa testeissä. Lukkorunkojen osalta vaihto toiseen onnistuu samaan tuoteperheeseen kuuluvien lukkojen osalta, joissa ainoastaan lukon toiminta vaihtuu esimerkiksi painikkeellisesta lukkorungosta vain avaimella avulla toimivaan lukkorunkoon. Sähkölukkojen ja kulunvalvontalaitteiden johdotukset voidaan laittaa kulkemaan profiilien sisällä, jos profiileihin tai niiden sisällä oleviin täytteisiin ei tule muutoksia. Lukkorunko saadaan joko poistaa ovesta kokonaan tai sitä voidaan käyttää lukittuna, jos testissä lukkorunko on ollut lukitsematta. Lisäksi lukkorunkoja, lukitussalpoja ja vastarautoja saa lisätä oveen, kunhan elementissä on ollut vähintään yhdet kyseisistä osista kiinnitettyinä ja lisättävät helat ovat olleet jossakin testissä aiemmin mukana.

Lukkojen ja salpojen määrää ei kuitenkaan saa vähentää testattuun elementtiin verrattuna. Yksittäisen lukon tapauksessa, lukon korkeutta saa muuttaa testatusta 300 mm suuntaan tai toiseen. Useamman lukon tapauksessa ylintä ja alinta lukkoa ei saa siirtää, mutta keskimmäisen asema voi liikkua maksimissaan 200 mm ylös- tai alaspäin. [8]

Painikkeita ja kahvoja voidaan lisätä ilman lisätestausta, jos kara on ainoa rakenteen läpi menevä osa. Myös muiden osien kiinnitys ovilehteen on sallittua, kunhan osa on palamatonta materiaalia (A1 luokitus) ja kiinnitys ei mene koko profiilin läpi syvyysuunnassa. Painikkeita ja kahvoja saadaan myös poistaa elementistä siinä tapauksessa, että niille kuuluvat kolot elementissä peitetään tai jätetään kokonaan tekemättä sekä lukkorunkoon ei tehdä muutoksia. Ovensuljin voidaan poistaa tai siirtää ovilehti-kiinnityksestä karmikiinnitteiseksi, jos se on testattu oven yhteydessä ilman suljintointimintoa. Ovensuljin voidaan vaihtaa myös toiseen, jos molemmat sulkimet ovat testattu aiemmissa testeissä. [8]

Saranat yhdessä varmistustappien kanssa varmistavat ovilehtien paikallaan pysymisen rakenteen liikkeiden ja muutosten aikana. Saranoiden ja varmistustappien kokoa saa kasvattaa enintään 50 % alkuperäiseen nähden, mutta pienennys ei ole sallittua. Saranoiden ja varmistustappien tyypin pysyessä samana, voidaan hyödyntää myös muiden valmistajien vastaavia saranoita ja varmistustappeja. Erityyppisiä, muun mallisia ja erilaisista materiaaleista valmistetut saranat ja varmistustapit voidaan vaihtaa elementtiin, jos ne on testattu aiemmissa testeissä. Määrän lisäys on mahdollista myös saranoiden ja varmistustappien kohdalla, mutta ei vähennys. Lisäksi lähimpänä nurkkia olevat saranat ja varmistustapit saavat liikkua lähemmäs nurkkaa, mutta ei nurkasta pois päin. Keskimmäisiä saranoita ja varmistustappeja taas voidaan liikutella suorien sovellusohjeiden mukaisesti eli alimman ja keskimmäisen saranan tai varmistustapin paikka voi pysyä muuttumattomana tai niiden etäisyys voi kasvaa toisiinsa nähden. [8]

2.4 Purson osastoivat rakennusjärjestelmät

Työssä käsiteltävä palo-ovijärjestelmä ei suinkaan ole ainoa osastoiva rakennusjärjestelmä johon Purso Oy valmistaa profileita tarvikkeineen. Purson osastoivien rakenteiden joukosta löytyy omat järjestelmät niin julkisivuille kuin hieman kevyemmille väliseinille sekä myös alhaisemmat luokitukset täyttävillä oville. Aikanaan Pursolla valmistettiin myös avattavia paloikkunoita, joiden valmistamisesta kuitenkin luovuttiin järjestelmän vanhentuuessa ja niiden vähäisen menekin takia. Purson valmistamia osastoivia järjestelmiä voidaan helposti yhdistää erilaisilla liittymäratkaisuille muiden tavallisten rakennusjärjestelmien kanssa yhteensopiviksi kokonaisuuksiksi. Lisäksi hyvin samantyylliset ulkonäöt kaikilla järjestelmillä varmistavat eri järjestelmien yhdistelyn mutkattomuuden ja yhteneväisyyden.

Työssä keskitytään Purson eristetyin P80-sarjan palo-ovijärjestelmän kehitystyöhön, jolle haetaan EN-standardien mukaista luokitusta EI₂60. Rakennusjärjestelmää kutsutaan eristetyksi järjestelmäksi lämpökatkojen käytön myötä, joista puhutaan myöhemmissä luvuissa lisää. Eristämättömissä rakennusjärjestelmissä profiilit muodostuvat

vain yhdestä yhtenäisestä alumiiniprofiilista, eikä näissä järjestelmissä käytetä lämpökatkoja ollenkaan. P80-sarjan järjestelmälle on aikaisemmin saatu EN-standardien mukainen E30 sekä EI₂₃₀ luokitus. Lisäksi Pursolla on valikoimassa myös eristämätön P50-sarjan palo-ovijärjestelmä, jolla on vielä tällä hetkellä voimassa oleva kansallisten määräysten mukainen E30 luokan tyyppihyväksyntä.

Julkisivupuolella Purso tarjoaa kantamattomissa osastoivissa rakenteissa EN-standardien mukaan testattua P50L-sarjaa, jolle on saatu luokitukset EI30 ja EI60 sekä sisä- että ulkopuoliselle palolle. Julkisivupuolen luokitusmerkinnät ja -ajat viittaavat samoihin asioihin kuin palo-ovien kohdallakin, mutta esimerkiksi polttokäyrissä sekä elementin pintalämpötilojen vaatimuksissa on pieniä eroavaisuuksia näiden järjestelmien välillä. Paloikkunoiden kohdalla Pursolla aikanaan testattiin tavalliseen LK68-sarjaan kuulunut ikkunajärjestelmä kansallisten määräysten mukaisella polttotestauksella, jolloin sille myönnettiin hyväksyntä EI15-luokitukselle. Nykyään koko LK68-sarja on korvaantunut tuoreemmilla rakennusjärjestelmillä, eikä toistaiseksi ole nähty tarpeelliseksi hakea paloluokitusta nykyisten järjestelmien ikkunaelementeille.

Purson LK68-sarjan korvannut eristetty ovi- ja ikkunajärjestelmä on nimeltään LK73. P50L-sarjan julkisivujen polttotesteissä oli mukana LK73-sarjasta tehty ulos- ja sisäänpäin aukeavat ikkunat. Tavallisista avattavista ikkunoista testeissä olleet versiot poikkesivat siten, että profiilien sisällä käytettiin palonsuojausta lisääviä kipsitäytteitä vastaavalla tavalla kuin muissa osastoivissa järjestelmissä. Lisäksi avattaviin ikkunoihin jouduttiin lisäämään teräksiset lasinkiinnikkeet sekä muutamia tukisokkia, joiden avulla poltossa pidettiin lasit paikoillaan ja tuettiin rakennetta. Koska avattavat ikkunat testattiin osana julkisivujärjestelmää, ei niille ole omaa tyyppihyväksyntää. Jos kuitenkin halutaan käyttää avattavaa ikkunaa yksittäisessä aukossa, voidaan sille hakea paikallista hyväksyntää kyseiseen kohteeseen julkisivupoltoista saatujen testitulosten avulla. Jokainen paikallinen hyväksyntä on kuitenkin tapauskohtainen ja käsitellään erillään muista hyväksynnöistä

2.4.1 Palorakenteiden profiilit ja profiilien muotoilu

Alumiininen rakennusjärjestelmä muodostuu monesta erilaisesta profiilista, joiden yhdistelmä lopullinen rakenne tulee olemaan. Peruskehä ja kiinteät lasitukset sekä rakenteen väliväät ja -pystyt syntyvät runkoprofiilien avulla. Lasien asentaminen paikoilleen tapahtuu lasituslistoja käyttämällä, jolloin saavutetaan se etu, että painavat lasit voidaan asentaa vasta viimeisten työvaiheiden joukossa kevyehkön runkokehän valmistuksen jälkeen. Erillisten ja erikokoisten lasituslistojen avulla mahdollistetaan myös lukuisten eripaksuisten lasien hyödyntäminen järjestelmän yhteydessä. Omanlaisensa profiilit tarvitaan niin aukkojen karmiosuuksille kuin myös ikkunoiden puitteille ja ovi-lehdillekin. Lisäksi, jotta kiinteitä aukkoja ja avautuvia ikkunoita tai ovia voidaan yhdistellä samaan rakenteeseen aukkojen avautumissuunnasta riippumatta, tulee järjestelmään suunnitella erityisiä huullos- ja kääntöprofiileita näiden toimintojen toteuttamiseksi.

Rakennusjärjestelmien perusaineeksi alumiini sopii mainiosti, sillä se on painonsa nähden varsin luja materiaali normaalissa huoneenlämpötilassa. Lisäksi alumiinin pursotustekniikka mahdollistaa varsin mielikuvituksellisten muotojen toteuttamisen kohtuullisilla kustannuksilla, jolloin profiilin muotoilulla voidaan tietyssä määrin parantaa rakenteen lujuusominaisuuksia. Pursotuksella pystytään myös toteuttamaan alumiiniprofiileille ominainen kiinnitystekniikka, niin kutsuttu napsutekniikka, jolla kaksi profiilia voidaan kiinnittää tukevasti toisiinsa ilman erillisiä kiinnitysmenetelmiä, kuten ruuveja tai liimoja. Kyseistä napsutekniikkaa hyödynnetään alumiinisissa rakennusjärjestelmissä etenkin lasituslistojen kiinnittämisessä perusprofiilin yhteyteen. Alumiinia voidaan lisäksi muokata sangen monella eri tavalla pursotuksen jälkeen, joten se soveltuu erittäin hyvin erilaisiin luoviin käyttökohteisiin. Myös alumiinin hyvä korroosionkesto suosii alumiinin käyttöä rakennusjärjestelmien raaka-aineena, sillä pintakäsittelynä alumiini on hyvin pitkäikäinen ja kulutusta kestävä materiaali vaativissakin olosuhteissa.

Paloteknisessä mielessä alumiini on toisaalta hieman haasteellisempi materiaali hallita kuin esimerkiksi puu tai teräs. Poltettaessa puuovea polttotestauksessa, oven perusmateriaali palaa hyvin rauhallisesti ja pikemminkin pyrkii vain hiiltymään varsin maltillista tahtia. Näin ollen rakenteen kestävyysominaisuuksissa ei tapahdu huomattavaa muutosta testauksen aikana. Puu on myös itsessään jo hyvä lämmöneriste, sillä esimerkiksi lastulevyn lämmönjohtavuus on luokkaa $0,14 \text{ W/Km}$ [9]. Vertailun vuoksi yleisesti lämmöneristeenä käytettävällä polystyreenilevyllä lämmönjohtavuuden arvo on noin $0,06 \text{ W/Km}$ [9]. Näin ollen puuoven eristyskyky on jo alun perinkin hyvää luokkaa, ja sitä entisestään pystytään parantamaan erilaisten lisämateriaalien käytöllä. Puu ei myöskään lämmön vaikutuksesta laajene kuin nimellisesti, joten polttotestauksessa puuovi säilyttää muotonsa varsin hyvin.

Teräs toisaalta ei tavallisten polttokokeiden lämpötiloissa korkean sulamispisteensä (yli $1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ansiosta vielä reagoi juuri millään tavalla kuumuuteen, vaan säilyttää muotonsa ja lujuutensa varsin hyvin pitkänkin polton aikana. Toki lämpötilan nousun vaikutuksesta teräs menettää osan lujuudestaan, mutta kantamattomilla rakenteilla muutos ei ole kovin radikaalia. Teräs kuitenkin johtaa lämpöä, muiden metallien tapaan, paljon paremmin kuin esimerkiksi puu, joten teräsoven eristävyys suhteen joudutaan käyttämään erilaisia ratkaisuja, joilla saadaan elementin pintalämpötilat pysymään riittävän alhaisina. Teräksen lämmönjohtavuus on luokkaa 50 W/Km [9]. Teräs laajenee puukuituihin nähden yli kaksinkertaisen määrän, joten teräsoven lämpölaajeneminen tulee ottaa huomioon, jotta teräsprofiilien uuninpuoleisen osan lämpölaajenemisesta aiheutuva elementin taipuminen ei muodostaisi suuria rakoja tai aukkoja testattavaan elementtiin.

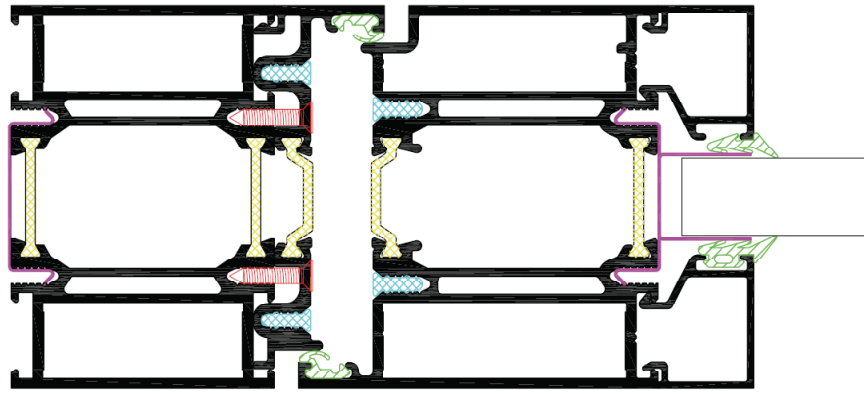
Alumiinin käytön haasteellisuutta kasvattaa alumiinin suhteellisen alhainen sulamispiste, joka on noin $660 \text{ }^{\circ}\text{C}$ alumiiniseoksesta juurikaan riippumatta. Kyseinen lämpötila saavutetaan polttotestauksessa jo ensimmäisten 10 minuutin kohdalla testin aloittamisesta, joten on väistämätöntä, että uuninpuoleiset profiiliseinämät alkavat jossakin vaiheessa polttotestausta sulamaan. Alumiinin kanssa mietintää aiheuttaa myös sen suu-

ri lämmönjohtavuus (236 W/Km), joka on vielä monin kerroin suurempi kuin teräksellä [9]. Näin ollen alumiiniprofiilien eristävyyskysymys vaatii ehdottomasti erityistarkastelua. Omat hankaluutensa aiheuttaa myös alumiinin suuri lämpölaajeneminen, sillä alumiinin lineaarinen lämpölaajenemiskerroin on huoneenlämmössä noin $24 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$, joka on kaksinkertainen teräsprofiileihin verrattuna. Esimerkiksi kaksi metriä korkean alumiinisen ovilehden 500 K :n lämpötilannousu aiheuttaa profiileihin jopa 24 mm suuruisen pituuskasvun. Tästä syystä polttotestien korkean lämpötilanmuutoksen seurauksena alumiiniprofiileista valmistetut elementit taipuvat voimakkaasti polttotestauksen aikana. Suuri elementin taipuma aiheuttaa myös huomattavan riskin rakojen ja aukkojen syntymiselle elementtiin sekä muodostaa myös ylimääräistä kuormitusta rakenteelle taiputusjännitysten muodossa.

Alumiiniprofiilien sulamista uuninpuolella ei voida kokonaan estää polttotestissä varsin korkeiksi nousevien lämpötilojen takia. Sulamista voidaan kuitenkin hidastaa erilaisin keinoin, joita paremmin esitellään seuraavassa luvussa rakenteiden lisämateriaalien yhteydessä. Profiilisuunnittelulla ja -muotoilulla voidaan kuitenkin vaikuttaa huomattavasti lämmönjohtumiseen alumiiniprofiileissa, jolloin estetään tai ainakin hidastetaan lämpötehon siirtymistä profiilien kuumalta uuninpuolelta vastakkaiselle kylmälle puolelle.

Lämmönsiirtymistä voisi ajatella eräänlaisena virtana samalla tavalla kuin nestemäisillä aineilla, jolloin virtauksen poikkipinta-alan pienentäminen aiheuttaa virtauksen etenemisen hidastumista. Tämä tarkoittaa profiilisuunnittelun kannalta sitä, että alumiiniprofiilien seinämät kannattaa pyrkiä pitämään mahdollisimman ohuina ja leveinä varsinkin profiilin syvyys suunnassa, jotta voitaisiin pelkällä profiilimuotoilulla pienentää lämmönsiirtymistä halutussa suunnassa. Ohut ja leveä seinämä on kuitenkin rakenteellisesti heikko kuormankantokyvyltään seinämän lommahdusriskin takia. Näin ollen pelkällä profiilimuotoilulla on yhtenäisillä profiileilla lähes mahdotonta estää uunissa vallitsevien lämpötilojen siirtyminen profiilin toiselle puolelle edellyttäen, että rakenteen kuormankantokyky säilyy riittävänä.

Tehokkaampi keino estää lämmönjohtuminen uuninpuolelta kylmälle puolelle elementtiä on tehdä lopullinen profiili kahdesta alumiiniprofiilin puolikkaasta, jotka yhdistetään toisiinsa nimensä mukaisesti lämpöä eristävällä lämpökatkolla, kuten kuvasta 2.9 voidaan nähdä. Lämpökatkojen materiaali tulee valita siten, että se toimii mahdollisimman hyvin lämpövirran kulkua estävänä eristeenä profiilien välillä, mutta se ei kuitenkaan saa heikentää profiilin syvyyssuuntaista jäykkyyttä, joten materiaalin tulee olla myös mahdollisimman jäykkää. Näihin syihin perustuen kyseisten lämpökatkojen materiaaliksi on valittu polyamidi PA66, joka on itsessään jo luja, jäykkä ja lämmönkestävä tekninen kestämuovi, mutta sen lujuus- ja kestävyysominaisuuksia on entisestään parannettu moninkertaisiksi lisäämällä perusmassaan lasikuitua täyteaineena.



Kuva 2.9. Ovilehtiprofiilin ja oven karmin poikkileikkauskuva, jossa karmiosa on muodostettu runko- ja huullosprofiilien yhdistelmänä. Kuvassa keltaisella näkyvät lämpökatkot, joiden avulla profiilipuolikkaat yhdistetään toisiinsa. Lisäksi kuvasta nähdään profiilipuolikkaisiin tehtyjen urien monikäyttöisyys eri kiinnitystarkoituksissa.

Alumiiniprofiilien uuninpuoleisen puolikkaan sulamista ei lämpökatkon tai muidenkaan yksinkertaisten keinojen avulla voida estää. Todellisuudessa lämpökatkot edistävät uuninpuoleisten profiilien sulamista, sillä lämpökatkojen takia lämpövirta ei pääse kulkeutumaan eteenpäin profiilia jäähdyttäen, vaan uunin lämpöteho sitoutuu lähes kokonaan profiilipuolikkaaseen sulattaen sitä nopeammassa tahdissa. Väistämättä joudutaan siis tilanteeseen, että koko rakenteen paino tulee pystyä pitämään muodossa pelkäämään alumiiniprofiilien toisen puolikkaan avulla. Näin ollen profiilisuunnittelun yhteydessä on molemmat profiilien puoliskot mitoitettava kestämään koko rakenteen paino niin, että elementti säilyttää polttokokeessa muotonsa, eikä suuria rakoja tai aukkoja pääse syntymään. Lisäksi tulee huomioida profiilin puoliskojen lämpenemisestä aiheutuva lujuusominaisuuksien aleneminen, jonka seurauksena profiilien jäykkyys laskee entisestään.

Profiilien taipuminen elementin muodostaman tasopinnan suunnassa on hyvin vähäistä, koska tasopinnan suunnassa sekä elementin lasit että umpiosat tukevat rakennetta varsin hyvin tukirakenteesta puhumattakaan. Suurempi ongelma on profiilien taipuminen niiden syvyysuunnassa. Kun profiilien seinämien vahvuutta ei haluta kasvattaa turhan suureksi sekä profiilien kokonaispainon rajoittamiseksi että lämpövirran etenemisen hidastamiseksi, täytyy profiileissa riittävän taivutusjäykkyyden saavuttamiseksi käyttää erilaisia muototekijöitä apuna. Profiilipuoliskon sisälle jäävään tilaan on hyvä asettaa ylimääräinen seinämä tuomaan lisäjäykkyyttä profiilille, jolloin saadaan profiilin taivutusjäykkyyttä syvyysuunnassa kasvatettua. Ylimääräisen seinämän asema tulee kuitenkin sijoittaa siten, että profiilien sisään jääviin kammioihin voidaan tarvittaessa lisätä sopiva määrä erilaisia täyttemateriaaleja, joilla voidaan parantaa profiilin palonkestoa. Ylimääräisestä seinämästä ei kuitenkaan rakenteen lämpölaajenemisesta johtuvan taipumisen yhteydessä ole juurikaan apua. Tämä johtuu siitä syystä, että ylimääräinen seinämä kasvattaa uuninpuolella laajenevan profiilipuolikkaan taivuttavaa voimaa lähes samassa suhteessa kuin mitä kylmällä puolella olevan profiilipuolikkaan taivutusjäykkyys kasvaa.

Profiilien pinnalla olevan oksidikerroksen sulamislämpötila on yli 2000 °C, joten alumiinioksidi ei polttotesteissä sula ollenkaan. Ylimääräisen seinämän alumiinimassan

sulaessa profiilinpuolikkaasta pois jää siitä jäljelle ohut, mutta yhtenäinen oksidikerros vähäksi aikaa seinämän paikalle. Näin ollen ylimääräisen seinämän avulla saadaan hetkellisesti parannettua myös profiilin omaa suojauskykyä, sillä ohut oksidikalvo estää lämmön suoran tunkeutumisen syvemmälle profiilin rakenteeseen, ennen kuin se murenee uunin pohjalle. Kuvan 2.9 profiileita suunniteltaessa on hyödynnetty kaikkia edellä mainittuja ohjenuoria ja saavutettu toimiva ratkaisu ehtojen välillä.

Profiilien muotoilua mietittäessä on hyvä huomioida myös kaikki kiinnitystarpeet kattavasti. Profiileihin mitä todennäköisimmin tullaan kiinnittämään erilaisia heloja, tiivisteitä ja kiinnikkeitä. Näitä tarkoituksia varten kuvan 2.9 profiilien kylkeen on lisätty erityiset urat, joihin voidaan helposti laittaa ovilehden ja karmin väliin jäävässä kulkuvälissä tarvittavat paisuvat tiivisteet sopivasti profiiliin piilotettuina, jotta ne eivät haittaa oven normaalia käyttöä ja ovat siistimmät näköiset ulospäin. Urat toimivat toisaalta lasien kyntetilan puolella valmiina kiinnityskohtina, johon tätä tarkoitusta varten muotoillut lasinkiinnikkeet voidaan tukevasti kiinnittää. Uria voidaan hyödyntää myös ruuviurina, jolloin sopivan kokoiset ruuvit voidaan kiinnittää profiileihin ilman erillistä alkureikää, jolloin säästytään yhdeltä työvaiheelta ja profiilien turhalta rei'ittämiseltä.

2.4.2 Rakenteissa käytettävät lisämateriaalit ja tukimekanismit

Alumiinista valmistettuun rakennusjärjestelmään liittyy luontaisena osana paljon muista materiaaleista valmistettuja osia ja komponentteja, jotka ovat välttämättömiä järjestelmän toiminnan kannalta niin normaalikäytössä kuin palotilanteessakin. Toiset osista ovat tarpeellisia lähinnä järjestelmän normaalikäytössä, eikä niillä varsinaisesti ole palonsuojauskykyä parantavia ominaisuuksia, kun taas osa tarvikkeista osoittaa tärkeytensä vasta tulipalon sattuessa. Lisäksi järjestelmien yhteydessä käytetään erilaisia oheismateriaaleja, joilla voidaan parantaa perusrakenteen ominaisuuksia, kuten esimerkiksi palonkestävyyttä tai rakenteen tiiviyyttä palotilanteessa.

Laseilla on suuri merkitys työssä tarkasteltavalle rakennusjärjestelmälle, sillä ne kattavat suurimman osan pinta-alasta koko rakenteesta. Lisäksi laseista aiheutuu myös valtaosa rakenteen kokonaispainosta, josta alumiinisen kehärakenteen kannettavaksi kohdistuu huomattava osuus. Palonsuojalaseja valmistetaan sekä karkaistuina, laminoituina sekä kaksikerroksisina eristylaseina. Pelkästään karkaistuja laseja käytetään, kun tarvitaan ainoastaan E- tai EW-luokitus rakenteelle. Karkaistut lasit kestävät ilman suurempien rakojen ja aukkojen muodostusta polttotestauksen, mutta kyseisten lasien lämmöneristävyys on heikkoa ja lasit lähettävät huomattavasti lämpösäteilyä elementin kylmälle puolelle.

Lasien ominaisuuksia voidaan parantaa lasien laminoinnilla, jossa joko karkaisu- tai tavallisten float-lasikerrosten väliin on lisätty palossa reagoivaa geelimaista ainetta, joka kuivuessaan liimaa lasikerrokset yhtenäiseksi paketiksi. Tämä geelimäinen, yleensä silikaattipohjainen aine aktivoituu lämmön vaikutuksesta ja turpooa sameaksi vaahtomaiseksi suojakerrokseksi lasien välissä. Turvonnut vaahtokerros estää hyvin lämpösäteilyn etenemisen elementin kylmälle puolelle sekä suojaa palon vaikutuksilta vaahtokerroksen taakse jääviä rakenteita. Lisäksi silikaattimassasta lämpötilan-

nousun vaikutuksesta vapautuva neste hidastaa lämmön johtumista, koska nesteen höyrystyessä faasimuunnos sitoo lämpöä, joten lasien pintalämpötilat pysyvät alhaisina. Palolasien valmistajasta riippuen palolaseissa voi olla joko yksi paksumpi laminointikerros kahden lasin välissä tai vastaavasti useampia laseja ja laminointikerroksia, mutta paljon ohuempina kerroksina.

Jos osastoiva rakenne on osa julkisivua, tulee lasien kohdalla huomioida palonkestävyyden lisäksi lasin normaali eristävyys rakennuksen energiatehokkuuden kannalta. Näin ollen palolaseja valmistetaan myös kaksikerroksisina eristyslasiversioina, joissa normaali float-lasi tai pinnoitettu selektiivilasi yhdistetään välilistan avulla palolasikerrokseen. Lasikerrosten välitilaan lisätään tavallisten kaksikerroslasien tapaan lasin eristävyyttä parantavaa kaasua, kuten esimerkiksi argonia. Rakennuksen ulkopinnoille asennettaessa laminoidut, silikaattigeeliä sisältävät lasit tulee olla ehdottoman tiiviisti asennetut ja kosteudelta suojatut, sillä silikaattikerrokset reagoivat herkästi veden kanssa ja liukenevat näin ollen helposti pois lasikerrosten välistä kostuessaan.

Normaalissa tapauksessa lasit asennettaisiin niiden reunoilla kulkeviin kehiin ainoastaan lasituslistoja käyttämällä sekä puristettaisiin tukevasti paikoilleensa lasitustiivisteiden avulla. Osastoivissa rakenteissa joudutaan kuitenkin käyttämään laseille ylimääräisiä kiinnikkeitä, sillä kuten aikaisemmin todettiin, sulaa toinen puolisko profiilista suurimmaksi osaksi pois polttotestin aikana. Ilman ylimääräisiä kiinnikkeitä lasit putoaisivat pois paikoiltaan profiilinpuoliskojen ja lasituslistojen sulaessa. Sulamisriskin takia kiinnikkeet täytyy valmistaa aineesta, jonka sulamispistettä ei testin aikana ylitetä eivätkä kyseisen materiaalin lujuusominaisuudet saa heikentyä dramaattisesti polton edetessä. Ruostumaton teräs on tähän tarkoitukseen hyvä valinta, sillä sen lujuusominaisuudet ovat riittävät korkeissakin lämpötiloissa sekä sen lämmönjohtavuus on aavistuksen pienempi kuin seostamattomalla teräksellä, jolloin ruostumattomasta teräksestä valmistetuilla lasinkiinnikkeillä syntyy vähäisempi lämpövirrantiheys kiinnikkeiden läpi uunin puolelta kylmän puolen profiilinpuoliskolle kuin tavallisesta teräksestä valmistetulla lasinkiinnikkeellä.

Osastoivien rakenteiden tiiviiden kannalta merkittävässä asemassa ovat erilaiset palotiivisteet, joilla tilkitään elementissä olevia rakoja, etteivät lämpö ja liekit pääse kulkeutumaan rakenteen läpi. Ovien ja avautuvien ikkunoiden toiminnan kannalta on karmi- ja puiteprofiilien väliin jätettävä pieni välys. Tästä syystä käyntiväleissä tarvitaankin lämmönvaikutuksesta turpoavia tiivisteitä, joilla nämä kyseiset välykset saadaan tukituksi polttotestin aikana. Myös lasien asennuksen kannalta täytyy lasin reunan ja karmiprofiilien väliin jättää sopiva asennusvara. Myös tämä asennusvara tulee tukkiintua lämpötilan noustessa testin aikana, joten lasien reunoillekin on syytä lisätä turpoavat tiivisteet. Turpoavista tiivisteistä löytyy kahdella eri periaatteella toimivia ratkaisuja, joista toiset pelkästään muodostavat turvotessaan palolta suojaavan kerroksen, kun taas toiset palonsuojauskyvyn lisäksi pystyvät myös hillitsemään lämmön nousua rakenteessa. Lämmön nousun hillitseminen perustuu tiivistemateriaalista vapautuvaan nesteeseen, joka sitoo höyrystyessään runsaasti lämpöä. Tällaiset tiivistemateriaalit pohjautuvat

hyvin vastaavanlaisiin silikaattipohjaisiin yhdisteisiin kuin mitä palolaseissakin käytetään.

Polttotestauksen olosuhteiden ollessa alumiiniprofiilien kannalta suhteellisen rajut heti testin alusta alkaen, ei pelkän profiilimuotoilun tai aikaisemmin mainittujen lämpökatkojen avulla pystytä estämään palon etenemistä profiilien kohdalla kovinkaan kauaa. Tästä syystä profiilien sisään täytyy lisätä palonsuojauskykyä parantavaa lisämateriaalia, jonka avulla pystytään mahdollisesti myös hidastamaan profiilien sulamista täytemateriaalin jäähdyttävän ominaisuuden avulla. Erilaisia profiilien täytevaihtoehtoja löytyy kaupallisessa muodossa jonkin verran ja niitä käsitellään työn tulevissa luvuissa tarkemmin.

Palonsuojamaaleilla voidaan edesauttaa profiilien kestämistä pidemmän aikaa taistelussa sulamista vastaan. Palonsuojamaalien teho perustuu profiilien pintakäsittelynä suoritettun maalin vaahtoamiseen lämmön vaikutuksesta, jolloin profiilien pintaan muodostuu palolta suojaava kerros. Lisäksi osa palonsuojamaalista toimii höyrystyessään jäähdyttävänä kerroksena profiilien pinnassa, jolloin pieni osuus uunissa muodostuvasta lämmöstä kuluu maalin höyrystymisen aikaansaamiseksi.

Myös oviin ja avattaviin ikkunoihin kiinnitettävillä heloilla on merkitystä palotilanteessa. Saranoilla tuetaan ovien ja avattavien ikkunoiden paikallaan pysymistä varsinkin testipolton alussa. Osa saranoista on kuitenkin tehty alumiinista ja erilaisista muoviosista, joten uunin puolella olevat saranat sulavat polttotestin aikana profiilien tapaan. Toisaalta teräksisillä saranoilla ongelmaksi nousee uuninpuoleisten profiilien sulaminen, sillä yleensä saranat ovat ainoastaan profiilin toisessa puoliskossa kiinni. Saranoissa mahdollisesti olevat muoviset osat sulavat tai ainakin huomattavasti pehmenevät testin kuluessa, vaikka saranat olisivat testattavan elementin kylmällä puolella. Näin ollen saranoiden tueksi täytyy rakenteeseen lisätä aukkojen saranapuolelle varmistustappeja, joilla varmistetaan oven tai avattavan ikkunan paikallaan pysyminen, kun saranointi menettää lujuutensa.

Ovien ja avattavien ikkunoiden painikkeen puolella aukon kiinnipysyvyys on normaalissa tilanteessa ainoastaan puitteessa olevan lukon teljen ja karmista löytyvän vastalevyn varassa. Ikkunoissa ja tietynlaisissa ovissa voi kuitenkin olla moniosaisia pitkäsalpoja, jolloin kiinnipysyvyys lukkopuolella on varmempaa ja turvallisempaa, koska aukko telkeytyy tällöin useammasta kohdasta. Ovien kohdalla rakenteeseen voi olla lisättynä käyttölukon lisäksi myös varmuuslukko, jonka telkeäminen parantaa oven paikallaan pysyvyyttä. Myös ovensulkimien kanssa voidaan oven kiinnipysyvyyttä parantaa niin kauan kuin ovensuljin pysyy toimintakuntoisena. Varsinkin uuninpuolelle sijoitettu ovensuljin voi menettää sulkuvoimansa testin edetessä ja pahimmassa tapauksessa irrota kokonaan rakenteesta profiilien sulamisen seurauksena. Sähköisesti ohjattavien ovensulkimien avulla voidaan myös toteuttaa normaalisti aukiolevien ovien sulkeminen tulipalon syttyessä. Pariovien kohdalla taas vasikkaoven paikallaan pysyvyys lukkopuolella saadaan suurimmaksi osaksi varmistettua lukitun pikasalvan avulla. Jos kuitenkin molemmat parioven ovilehdistä ovat normaalisti käytössä, voidaan käyttää

parioville tarkoitettuja ovensulkimia, joiden avulla pystytään toteuttamaan lisäksi synkronoidut pariovien sulkemiset, jos se on tarpeellista.

2.5 Rakennustuotteiden CE-merkintä

Euroopan yhteisön asettamat direktiivit luovat pohjan CE-merkinnälle. Vuonna 1988 asetetun rakennustuotedirektiivin 89/106/ETY tarkoituksena on ollut avata Euroopan sisäisiä markkinoita mahdollisimman monelle valmistajalle ja samalla turvata heidän markkinoillepääsyänsä koko Euroopan talousalueella. Tällä tavoin pyritään myös eliminoimaan kaupankäynnin teknisiä esteitä luomalla harmonisoitu järjestelmä yleisille määräyksille rakennusteollisuudessa. CE-merkinnällä yritetään tukea rakennustuotteiden valmistajien vientiä eri maihin helpottamalla rakennustuotteiden ominaisuuksien vertailua ja sopivuutta kohteeseen yhdenmukaisen ilmoitustavan avustuksella. Toisin sanottuna CE-merkintä on direktiiveihin perustuva vaatimustenmukaisuusmerkintä. [10]

CE-merkintä ei kuitenkaan varsinaisesti ole laadun tae, eikä se edes varmistaa, että CE-merkillä varustettu rakennustuote olisi käyttökelpoinen kaikissa eurooppalaisissa maissa. CE-merkinnällä ainoastaan luodaan pohja tietyille rakennustuotteiden ominaisuuksille, mutta näitä ominaisuuksia on kansallisilla viranomaisilla mahdollisuus ja velvollisuus täydentää tarpeen mukaan maan olosuhteisiin soveltuviksi. Esimerkiksi Suomessa on erityisen tärkeää ottaa huomioon pakkasen vaikutus rakenteiden lujuudelle ja kestävyydelle, kun taas Espanjassa on paljon tärkeämpää huomioida esimerkiksi tuulen voimakkuus rakennuksia suunniteltaessa. [11]

On kuitenkin huomioitava, että vaikka kansallisia määräyksiä sallitaan vielä CE-merkinnän pakolliseksi tulon jälkeen, voivat kansalliset määräykset olla kuitenkin vain CE-merkintää tarkentavia ominaisuuksia. Jos kansallisissa säädöksissä on asetuksen kanssa ristiriitaisia vaatimuksia, tulee ne kumota, sillä asetusta täytyy soveltaa sellaiseen kaikissa jäsenvaltioissa. Kansallisissa määräyksissä ei saa asettaa rakennustuoteasetuksen mukaan sellaisia ominaisuusmäärittäjiä, jonka luokitukseen CE-merkintä ottaa jo kantaa. Näin ollen esimerkiksi Saksassa ja Suomessa valmistetuilla palo-ovilla sallitaan ainoastaan CE-merkinnän mukaiset luokitukset palonkeston suhteen, eikä kummankaan maan viranomaiset voi vaatia kansallisten määräysten sisällä esimerkiksi tiukennettuja lämpötilannousun rajoja tai muuten EN-standardien mukaisesti luokitukselta poikkeamista kyseisille tuotteille. CE-merkinnällä yritetään nimenomaan poistaa tällaisista erilaisista vaatimuksista johtuvia teknisiä kaupan esteitä. [10] [11]

Rakennustuotteilla tarkoitetaan rakennusosia ja -materiaaleja sekä myös esivalmisteisia järjestelmiä ja laitteistojen komponentteja, jotka jäävät kiinteästi rakennuksiin rakennusvaiheen jälkeen. Ei sarjatuotantoiset tuotteet, jotka ovat valmistettu erikoistilauksesta vain tiettyyn kohteeseen, ja joiden kiinnityksestä rakennukseen vastaa niiden valmistaja, katsotaan kuuluvan rakennustuotteiden ulkopuolelle, jolloin CE-merkintää ei tarvita. Euroopan komissio ei kuitenkaan vielä ole määritellyt kovin tarkasti, mitkä tuotteet voidaan laskea sarjatuotannon ulkopuolelle. Myös suoraan rakennuspaikalla valmis-

tettavat tuotteet, jotka kiinnitetään rakennukseen urakoitsijan toimesta, eivät tarvitse CE-merkintää. Vielä kuitenkin on epäselvää tuleeko tällaiset tuotteet rakentaa mahdollisuuksien mukaan CE-merkityistä osista ja materiaaleista vai voidaanko tuote valmistaa kyseiseen kohteeseen parhaiten soveltuvimmista materiaaleista ja osista. Täysin omalukunsa on lisäksi historiallisesti tärkeät ja suojellut kohteet, joiden korjausrakentamisessa edellytyksenä on alkuperäistä rakennetta vastaava tuote ennemmin kuin CE-merkinnän vaatimustenmukaisuus. [11]

Rakennustuotteiden kohdalla rakennustuoteasetus 305/2011, joka on osa jäsenmaiden lainsäädäntöä, korvaa voimassa olevan rakennustuotedirektiivin siirtymäajan umpeutuessa. Rakennustuoteasetus tuli jo osittain voimaan 24. huhtikuuta 2011 ja sen siirtymäaika loppuu 1. heinäkuuta 2013, jolloin myös CE-merkintä rakennustuotteiden kohdalla tulee asetuksen mukaan pakolliseksi. Näin ollen CE-merkintä tulee olemaan merkittävässä osassa ja asemassa koko rakennusteollisuutta tulevien vuosien aikana. [10]
































Tuotteen CE-merkintä mahdollistuu, kun tuotteelle on ilmestynyt harmonisoitu tuotestandardi eli niin sanottu hEN-standardi. Harmonisoitu tuotestandardi määrittelee ne ominaisuudet, jotka kyseiselle rakennustuotteelle voidaan CE-merkinnässä ilmoittaa. Harmonisoitu tuotestandardi sisältää myös ohjeita ja määräyksiä tuotteen valmistuksen laadunvalvonnasta sekä rakennustuoteasetuksen tulkinnasta. Lisäksi tuotteelle löytyy erilaisia viitestandardeja, kuten testaus-, laskenta- ja luokitusstandardeja, joissa selvitetään tuotteen ominaisuuksien laskenta- ja testausperusteet sekä tuotteen vaatimukset ja ehdot ominaisuuksien täyttymiseksi. [10]



Ennen rakennustuoteasetuksen voimaan astumista, jos tuotteelle ei ole ilmestynyt harmonisoitua tuotestandardia, voidaan tuotteelle hakea eurooppalaista teknistä hyväksyntää, jonka avulla tuotteelle voidaan myöntää CE-merkintä. Eurooppalainen tekninen hyväksyntä (ETA, European Technical Approval) on tekninen arvio, jolla määritellään tuotteen soveltuvuus sen käyttökohteessa rakennustuoteasetuksessa ilmoitettujen vaatimusten mukaisesti. Eurooppalaisen teknisen hyväksynnän voi myöntää EOTA:n (European Organisation for Technical Approvals) jäsenlaitokset, joka hyödyntää prosessissa tuotehyväksyntäohjetta (ETAG, ETA Guideline). ETA-ohje pitää sisällään tiedon, kuinka EOTA:n jäsenlaitoksen tulee arvioida tuotteelle asetuksessa esitetyt vaatimukset ja ominaisuudet. Huomioitavaa on, että eurooppalainen tekninen hyväksyntä ei ole pakollinen tuotteelle, vaan sen tarkoituksena on pelkästään CE-merkinnän hengessä avata Euroopan talousalueen markkinoita tuotteelle mahdollisimman laajasti. [10]

ETA-ohjeen laadinta käynnistyy EOTA:n toimesta, mutta ETA-ohjetta ei luoda automaattisesti, vaan ainoastaan perustelluista syistä ja yrityksen tekemän hakemuksen perusteella. Jos ETA-ohjetta ei tuotteelle ole vielä laadittu, on mahdollista hakea eurooppalaista teknistä hyväksyntää myös CUAP-menettelyssä (Common Understanding of Assessment Procedure), jossa EOTA:n hyväksymiselin sekä Euroopan komissio yhteisellä suostumuksella voi myöntää tuotteelle teknisen arvion. Sekä ETA-ohjeen avulla myönnetty eurooppalainen tekninen hyväksyntä että varsinkin CUAP-menettelyssä haettu hyväksyntä ovat tuotekohtaisia ja vaativat valmistajalta kyseisen hyväksynnän ha-

kemista EOTA:n kautta. ETA-hyväksyntä on aina valmistaja- ja tuotekohtainen, joten jokainen valmistaja joutuu hakemaan omalla nimellään tuotteelle teknisen arvioinnin CE-merkintää varten. [10]

Valmistajan vastuulle CE-merkinnän käyttöönotossa koituu tarvittavien testien tekeminen, erilaisten asiakirjojen laatiminen sekä huomattava määrä laadunvalvontaa tuotteen valmistusprosessissa. Harmonisoitujen tuotestandardien opastavasta ZA-liitteestä ilmenee tuotteen tekniset ominaisuudet, jotka CE-merkintään voidaan laittaa, sekä ominaisuuksien ilmoitustavat, millä tavalla ne CE-merkinnässä tulee esiintyä. CE-merkinnässä huomioitavaa on myös se, että siihen ei tarvitse sisällyttää kaikkia ominaisuuksia, joille CE-merkintä on mahdollista. Jokaisen tuotteen kohdalla voidaankin valita ainoastaan ne ominaisuudet, joille CE-merkintä tahdotaan. Lisäksi edellä mainitusta liitteestä selviää tuotteen vaatimuksenmukaisuuden osoittamiseksi velvoittava menettelytapa, AoC-luokka (Attestation of Conformity). AoC-luokat jakaantuvat kuvan 2.10 taulukossa esitettyihin kategorioihin, joista selviää myös eri osapuolille kuuluvat tehtävät. Komissio päättää jokaisen tuotteen ja käyttökohteen mukaan, mitä AoC-luokkaa kulloinkin edellytetään. Esimerkiksi palo-ovet kuuluvat AoC-luokituksessa luokkaan 1, jossa ilmoitetun laitoksen vastuulla on tyyppihyväksyntätestauksen lisäksi myös yrityksen sisäisen laadunvalvonnan alkutarkastus sekä sen jatkuva valvonta, arviointi ja hyväksyminen. Yrityksen kontolle jää sisäisen laadunvalvonnan noudattaminen ja suorittaminen sekä valmistuksesta otettujen näytteiden testaaminen tietyin väliajoin. [10]

Vaatumustenmukaisuuden osoittamisessa käytettävät menettelyt								
KONTROLLIKENOT	1+	1	2 +		2		3	4
Tuotteen tyyppitestaus								
Tehtaalta otettujen näytteiden testaus								
Tehtaalta, markkinoilta tai rakennuspaikalta otettujen pistokenäytteiden testaus								
Tehtaan sisäinen laadunvalvonta								
Tehtaan ja sen sisäisen laadunvalvonnan alkutarkastus								
Tehtaan sisäisen laadunvalvonnan jatkuva valvonta, arviointi ja hyväksyminen								

 = valmistaja
  = arviointilaitos (ns. ilmoitettu laitos)


Kuva 2.10. Eri osapuolten tehtävät AoC-luokkien vaatimuksenmukaisuuden osoittamisen menettelytavoissa. [10]

Rakennustuoteasetuksen voimaan astumisen jälkeen CE-merkinnän hakeminen siinä tapauksessa, että harmonisoitua tuotestandardia ei ole vielä julkaistu, muuttuu

hieman edellä esitetystä ETA-ohje tai CUAP-menettelystä. ETA-ohjeet tulevat olemaan voimassa aina siihen asti, kunnes ne korvautuvat eurooppalaisilla arviointiasiakirjoilla (EAD, European Assessment Document). EAD:ien tullessa voimaan, korvautuvat myös direktiivien määrittelemät eurooppalaiset tekniset hyväksynnät niitä vastaavilla eurooppalaisilla teknisillä arvioinneilla (myös lyhenne ETA, European Technical Assessment). Terminologian muuttuessa päätavoite ei kuitenkaan ole muuttunut siirryttäessä direktiivistä asetuksen pariin, vaan asetuksen avulla pyritään paremmin pääsemään kaupan teknisten esteiden poistamiseen ja tuotteiden vapaaseen liikkuvuuteen, johon direktiivin voimin ei aivan päästy. Asetuksessa on pyritty yksinkertaistamaan ja selkiyttämään CE-merkintään liittyvää toimintaa ja näin ollen parantamaan prosessien avoimuutta ja tehokkuutta. [12]

Tuotteiden vaatimustenmukaisuuden osoituksen määrittelyt ja kriteerit pysyvät lähes muuttumattomina, mutta ainoastaan niiden nimitys muuttuu asetuksen myötä suoritustason pysyvyyden arviointi ja varmennusjärjestelmäksi (AVCP, Assessment and Verification of Constancy of Performance). Lisäksi luokka 2 jää asetuksen voimaan asetuksessa pois luokkien järjestelmänimikkeistä. [11]

Uutena asiana rakennustuoteasetus tuo mukanaan suoritustasoilmoituksen (DoP, Declaration of Performance), joka pitää sisällään kattavan selvityksen tuotteen ominaisuuksista. Suoritustasoilmoituksessa esitetyt tuotteen ominaisuudet tulee yleensä varmentaa ulkopuolisen tahon eli ilmoitetun laitoksen avulla. Suoritustasoilmoituksen luomiseksi löytyy valmis pohja rakennustuoteasetuksen liitteestä III. CE-merkintätiedot tulee toimittaa kahdessa muodossa tuotteen mukana, joista toinen on yksinkertaistettu tiedonanto eli kuten kuvassa 2.11 esitetty esimerkki CE-merkistä, ja toinen on täydellisemmät tiedot sisällään pitävä suoritustasoilmoitus. [11]

	
Alumiinikarrit Oy Alumiinikatu 1 12345 Aluniemi	Valmistajan nimi ja osoite
05	Valmistusvuosi
EN 13830:2003 Julkisivujärjestelmä PURSO P50L/P50LE Käytetään rakennusten ulkoseinissä	Tuotestandardin numero
Vesitiiviys : RE ₁₀₅₀ Ilmanläpäisevyys : AE ₁₀₅₀ Tuulikuormankestävyys : 0.7 kN/m ² Ompainonkestävyys : 0.5 kN/m ² Lämpönläpäisykerroin : 1.4 W/m ² K Ilmaneneristävyyden : 37(-2;-4) dB Iskunkestävyys : NPD Vaakavoimankestävyys : NPD Lämpönnitystenkestävyys : NPD Palokäyttäytyminen : NPD Palonkestävyys : NPD Palonlevittäminen : NPD	Järjestelmän kuvaus
	VTT:n testausseleste RTE3686/5
	VTT:n testausseleste RTE3686/5
	Tuulikuorma jolle rakenteet on mitoitettu. Testattu 2,0 kN/m ² asti (VTT RTE3686/5).
	Ompaino jolle rakenteet on mitoitettu, vaakarungot + kiinnitykset. (VTT RTE4795/05)
	Standardin prEN 13947 mukaan laskettu julkisivun lämmönläpäisykerroin U _{ew}
	Määräytyy käytetyn lasin mukaan. (VTT RTE3966/05)
	Ei määritetty
	Jos vaaditaan: Vaakavoima jolle rakenteet on mitoitettu (kaide). (VTT RTE4795/05)
	Jos vaaditaan: Koskee lasia, lasin luokitus.
	Ei määritetty
	Ei määritetty
	Ei määritetty

Kuva 2.11. Esimerkki CE-merkistä, joka tulee liittää tuotteen yhteyteen tai toimittaa erillisenä tuotteen mukana.

Rakennustuoteasetuksessa tuodaan CE-merkinnästä esille myös yksinkertaistettu menettelytapa (STD, Specific Technical Documentation) mikroyritysten kohdalla, joissa työskentelee korkeintaan 10 henkilöä. Tarkoituksena kyseisillä pykälillä on mahdollistaa mikroyritysten tuotteiden CE-merkintä helpotetuin käsittelyproseduurein. Ongelmana vielä kuitenkin on pykälien käyttöönoton hankaluus, sillä kuitenkin loppujen lopuksi yksinkertaistetulla menettelyllä saadun CE-merkinnän tulee täysin vastata muita CE-merkintöjä ja olla yhtä luotettava kuin standardien perusteella haettu CE-merkintä. [11]

Tuotteen tyyppihyväksyntä on tähän mennessä perustunut kansallisiin määräyksiin ja se on ollut, sekä tulee jatkossakin olemaan merkittävässä asemassa CE-merkinnän rinnalla, niillä rakennustuotteilla, joille CE-merkintä ei ole vielä mahdollista, tai joille ei haluta syystä tai toisesta hakea CE-merkintää eurooppalaisen teknisen arvioinnin kautta. Esimerkkinä palo-ovien kohdalla CE-merkintä ei tule olemaan vielä mahdollista siinä vaiheessa, kun CE-merkintä vuoden 2013 kesällä tulee pakolliseksi. Tämä johtuu siitä, että palo-ovien harmonisoitu tuotestandardi ei ole valmistunut. Näin ollen tyyppihyväksyntä säilyttää asemansa palo-ovien kohdalla harmonisoidun tuotestandardin ilmestymiseen asti. Tyyppihyväksyntöjen kohdalla on kuitenkin linjattu, että jos harmonisoitu tuotestandardi on valmisteilla tuotteelle, ei tyyppihyväksyntöjä myönnetä tai jatketa kuin vuodeksi kerrallaan aikaisemman viiden vuoden sijaan.

CE-merkinnän ja tyyppihyväksynnän välillä on paljon yhteisiä piirteitä, eikä siirtyminen tyyppihyväksynnästä CE-merkintään tule olemaan valtavan suuri. Esimerkiksi nykyään tehtävät tyyppihyväksyntätestit palo-oville suoritetaan täsmälleen samojen EN-standardien avulla ja vastaavien vaatimusten mukaisesti kuin ne tullaan CE-merkinnän suoritustasoilmoituksenkin kohdalla edellyttämään. Yksi merkittävä keskustelun aihe tällä hetkellä on kuitenkin se, että millä tavalla tyyppihyväksyntää varten suoritettuja testejä voidaan hyödyntää CE-merkinnän mahdollistuessa vai joudutaanko CE-merkinnän vuoksi testaamaan kaikki rakennustuotteet uudestaan joka tapauksessa. Yksi eroavaisuus tyyppihyväksynnän ja CE-merkinnän testauksen välillä ainakin jo nyt löytyy, sillä tyyppihyväksynnässä riittää, että testausraportin kirjoituksen suorittaa ilmoitettu laitos, mutta tuotteen testauksen voi suorittaa kuka tahansa ilmoitetun laitoksen hyväksymä taho. CE-merkinnän edellytyksenä taas on, että testausraportin ja sitä seuraavan suoritustasoilmoituksen kirjoittamisen lisäksi myös itse tuotteen testaus on toteutettu ilmoitetun laitoksen toimesta.

2.6 Lämmönsiirrosta

Tämän luvun tarkoituksena on esitellä hyvin lyhyesti työssä tehtävien lämmönsiirtolas-kujen teoriaa. Aiheesta esitellään perusilmiöt ja niiden taustalla olevat kaavat, jotta voitaisiin ymmärtää mitkä tekijät vaikuttavat lämpöenergian siirtymiseen ja välittymiseen kappaleen pinnalta toiselle.

Suurin yksittäinen tekijä lämmönsiirtymiselle syntyy työn tapauksessa lämmönjohtumisesta. Johtuminen tarvitsee aina väliaineen, jota pitkin lämpö pääsee kulkeutumaan paikasta toiseen. Tärkeintä on, että väliaine sisältää hiukkasia tai partikkeleita,

joiden välityksellä lämpöenergia pääsee siirtymään. Ideaalisessa tyhjiössä ei ole laisinkaan hiukkasia tai partikkeleita, joten tyhjiössä ei tapahdu ollenkaan lämmönjohtumista. Johtumista tapahtuu sekä kaasumaisissa, nestemäisissä että kiinteissä väliaineissa. Kaasuissa johtumalla siirtyvä lämpömäärä on kuitenkin hyvin vähäistä, kun taas metallien kohdalla johtumalla siirtyy huomattavasti lämpöä kappaleen läpi.

Lämpöteho $[W]$, joka väliainetta pitkin kulkeutuu, voidaan laskea yksiulotteisessa johtumisessa levyssä kaavalla

$$q_k = \frac{k \cdot A_k}{L_k} (T_1 - T_2), \quad (3)$$

missä k on johdinaineen lämmönjohtavuus, A_k on kappaleen johtumissuuntaan nähden kohtisuorassa oleva poikkipinta-ala, L_k on johtumissuunnassa mitattu johtumisetäisyys ja T_1 ja T_2 ovat kappaleen pintojen lämpötilat [9]. Kaavasta voidaan päätellä, että johtumalla siirtyvää lämpömäärää saadaan pienennettyä, jos valitaan materiaali, jolla on pieni lämmönjohtavuus, pienennetään johtumiseen käytettävää poikkipinta-alaa, kasvatetaan pintojen välistä etäisyyttä tai pienennetään pintojen välistä lämpötilaeroa.

Toinen lämmönsiirtotapa on konvektio, joka tarvitsee joko kaasumaisen tai nestemäisen väliaineen, jotta lämpöenergian siirtyminen mahdollistuu. Konvektiossa kuumman pinnan ohi virtaava viileä väliaine sitoo pinnan luovuttamaa lämpöä itseensä ja näin lämpöteho siirtyy väliaineen mukana eteenpäin. Konvektiossa siirtyvä lämpöteho lasketaan kaavalla

$$q_c = h_c \cdot A_c (T_s - T_\infty), \quad (4)$$

jossa h_c on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, A on kappaleen pinta-ala, johon virtaus vaikuttaa, T_s on kappaleen pintalämpötila sekä T_∞ on ympäristön lämpötila [9]. Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin riippuu kaikista eniten väliaineen virtausnopeudesta sekä sen tyypistä ja virtaavan aineen ominaisuuksista. Lisäksi lämmönsiirtokerroin riippuu kappaleen pinnanmuodoista ja -laadusta. Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen laskeminen suoritetaan erilaisten korrelaatiokertoimien avulla ja sen määrittely tietylle pinnalle on varsin monimutkaista ja vaatii hyvää perehtymistä kyseiseen aihealueeseen. Jos konvektiiviseen lämmönsiirtokertoimeen ei haluta puuttua, voidaan konvektion avulla siirtyvän lämpömäärän suuruuteen helpoiten vaikuttaa kappaleen pinta-alaa tai ympäristön ja kappaleen pinnan lämpötilaeroa muuttamalla.

Luonnollinen konvektio syntyy, kun ympäristöään kuumempi kappaleen pinta lämmittää pinnan viereistä väliainekerrosta. Lämpenemisestä johtuen väliainekerroksen tiheys pienenee, jonka seurauksena lämmennyt väliainekerros lähtee kohoamaan ylöspäin. Lämmenneen ja kohonneen väliainekerroksen tilalle kappaleen pinnan viereen tulee muualta ympäristöstä tiheämpää ja viileämpää väliainetta, jolloin luonnollinen kiertokulku on valmis syntymään. Tätä kiertoa kestää aina siihen asti, kunnes kappaleen pinta on ympäristönsä kanssa samassa lämpötilassa. Pakotetussa konvektiossa väliai-

neen liike muodostetaan nimensä mukaisesti esimerkiksi koneellisesti, jolloin voidaan tehostaa lämmönsiirtymistä väliaineeseen suuremman lämpötilaeron johdosta.

Lämpösäteily on kolmas lämmönsiirtotavoista, mutta toisin kuin lämmönjohtumisessa ja konvektiossa, säteily ei tarvitse väliainetta siirtymiseen. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota kaikki kappaleet lähettävät ympäristöönsä. Toisaalta kaikki kappaleet myös vastaanottavat säteilyä. Se paljonko kappaleeseen osuvasta lämpösäteilystä absorboituu kappaleen sisälle ja paljonko toisaalta heijastuu pinnasta takaisinpäin tai kulkeutuu kappaleen läpi, määräytyy kappaleen pinnan emissiivisyydestä. Teoreettinen musta kappale absorboi kaiken siihen osuvan säteilyn ja emittoi tietyssä lämpötilassa maksimimäärän säteilyä. Näin ollen on määritetty, että mustan kappaleen emissiviteetti ε on 1. Kahden yhdensuuntaisen tasolevyn välinen säteilyn välityksellä siirtyvä lämpöteho saadaan laskettua kaavalla

$$q_r = A_r \cdot \varepsilon \cdot \sigma(T_1^4 - T_2^4), \quad (5)$$

missä A on säteilevän pinnan pinta-ala, ε on pintojen tehollinen emissiivisyys, σ on Stefan-Boltzmannin vakio ja T_1 ja T_2 ovat kappaleen pintojen lämpötilat [9]. Kaavan mukaan säteilevän pinnan suurentamisella, emissiivisyyden kasvattamisella sekä ympäristön ja pinnan välisen lämpötilaeron lisäämisellä voidaan pinnasta lähtevän säteilyenergian määrää kasvattaa.

3 TIEDONHAKU JA TUTKIMUSMENETELMÄT

Työn johdannossa esitellyn ongelman ratkaisemiseksi eli Purson valmistaman EI60-luokan osastoivan palo-ovijärjestelmän tiiveyden ja eristävyysparantamiseksi suoritettiin ensimmäisenä erilaisten palonsuojausmenetelmien kattava kartoitus. Tarkoituksena oli kerätä mahdollisimman monta ja erilaista tapaa parantaa rakenteen palonkestävyyttä. Vielä tässä työn vaiheessa ei haluttu hylätä minkäänlaisia ehdotuksia, jos vain menetelmän avulla voitaisiin millään tavalla edistää palonsuojausta kyseisessä järjestelmässä. Perimmäisenä ajatuksena ei ollut löytää yhtä ainoaa tapaa ratkaista työssä asetettu ongelma, vaan hakea parasta yhdistelmää löydettyjen menetelmien joukosta. Näin ollen sellaisetkin menetelmät voisivat nousta merkittäviksi, jotka yksittäin tarjoavat vain vähäisen palonsuojauskyvyn, mutta yhdistettynä toisten menetelmien kanssa parantavat kokonaissuojaustehoa huomattavasti. Tästä syystä haluttiinkin vasta työn lopussa valita löydettyistä vaihtoehtoista tehokkuuden, kokoonpantavuuden ja hinnan suhteen paras kombinaatio.

Palonsuojausmenetelmien kartoituksen jälkeen täytyi tavalla tai toisella selvittää kerättyjen palonsuojausmenetelmien tehokkuus, johon soveltuvin osin käytettiin laskennallista tutkimusta apuna. Paloteknisessä mielessä laskennallinen tutkimus on kuitenkin äärettömän haastavaa, joten työn tiimoilta voitiin laskennan avulla hankkia vain ainoastaan tukevaa ja suuntaa-antavaa tietoutta eri menetelmien tehokkuudesta. Näin ollen tarkempien tutkimustulosten saamiseksi rakennettiin kehitystyötä varten pieni polttotestausuuni, jonka avulla pystyttiin suorittamaan käytännön testausta selvitetuille palonsuojausmenetelmille paljon tarkemmin ja hyödyllisemmin.

3.1 Tiedonhaku

Tärkeimpinä tiedonlähteinä eri palonsuojausmenetelmien kartoitusvaiheessa toimi aikaisempien tuotekehitysprojektien pohjalta saatu materiaali sekä erilaisten palonsuojaustuotteiden valmistajien Internet-sivut. Tiedonhaun yhteydessä selvitettiin myös voimassaolevat palonsuojaukseen liittyvät patentit sekä patenttikirjastojen kautta että vastaavanlaisten osastoivien rakenteiden valmistajien tiedoista, jotta välttyttäisiin rikkomasta kenenkään patenttioikeuksia.

Löydettyjen menetelmien kohdalla tehtiin tämän jälkeen lisäselvitystä tuotteen valmistajalta, niin puhelimitse kuin sähköpostin välitykselläkin, tuotteen tarkemmista ominaisuuksista, käyttösuosituksista ja tuotteen käytön kustannuksista. Joidenkin tuotteiden kohdalla tehtiin myös jatkoselvitystä, voisiko vastaavaa tuotetta valmistaa Purson toimesta itsenäisesti suoraan halutunlaiseksi valmisteeksi. Tämä edellytti kyseisten tuotteiden taustalla olevan teorian selvitystä ja sisäistämistä.

3.2 Laskennallinen tutkimus

Palotapahtumien luotettava mallinnus ja matemaattinen tarkastelu lämmönsiirron tapauksessa on alumiiniselle rakennusjärjestelmälle lähes mahdotonta toteuttaa vielä nykyhetkellä. Palossa tapahtuvien asioiden ennalta-arvaamattomuus sekä materiaalien sulamisesta aiheutuvat rakennemuutokset tekevät mallinnuksesta hankalaa ja laskennallisen tutkimuksen hyvin vaikeaksi. Oman haasteellisuutensa matemaattiseen tarkasteluun aiheuttaa myös suurista lämpötilaeroista johtuva voimakas lämpösäteily elementin eri osien välillä, sekä myös lämpötilaeroista syntyvän luonnollisen konvektion mallinnus totuudenmukaisesti. Edellä mainittujen asioiden seurauksena työssä tehtävät matemaattiset tarkastelut toimivatkin ainoastaan käytännöntestauksen tukena ja päätelmien varmistamista varten.

Rakenteiden mallinnuksen ja niille tehtävien lämmönsiirtotarkasteluiden avulla voidaan riittävien yksinkertaistuksien ja erilaisten oletusten myötä selvittää tiettyjen yksittäisten asioiden vaikutusta koko rakenteen toimintaan, mitä käytännön testauksella on vaikea selvittää rakenteen monimutkaisuudesta johtuen. Lämmönsiirtotarkasteluiden apuna voidaan käyttää käytännön testauksesta saatuja arvoja laskennassa käytettäville suureille, jolloin tulokset ovat paremmin vertailukelpoisia absoluuttisten arvojen kanssa. Toisaalta turvallisempaa on selvittää ainoastaan laskennan avulla saatujen tulosten suuruusluokka toisiinsa nähden ja tutkia tämän jälkeen menetelmien absoluuttisten arvojen suuruus käytännön testeillä.

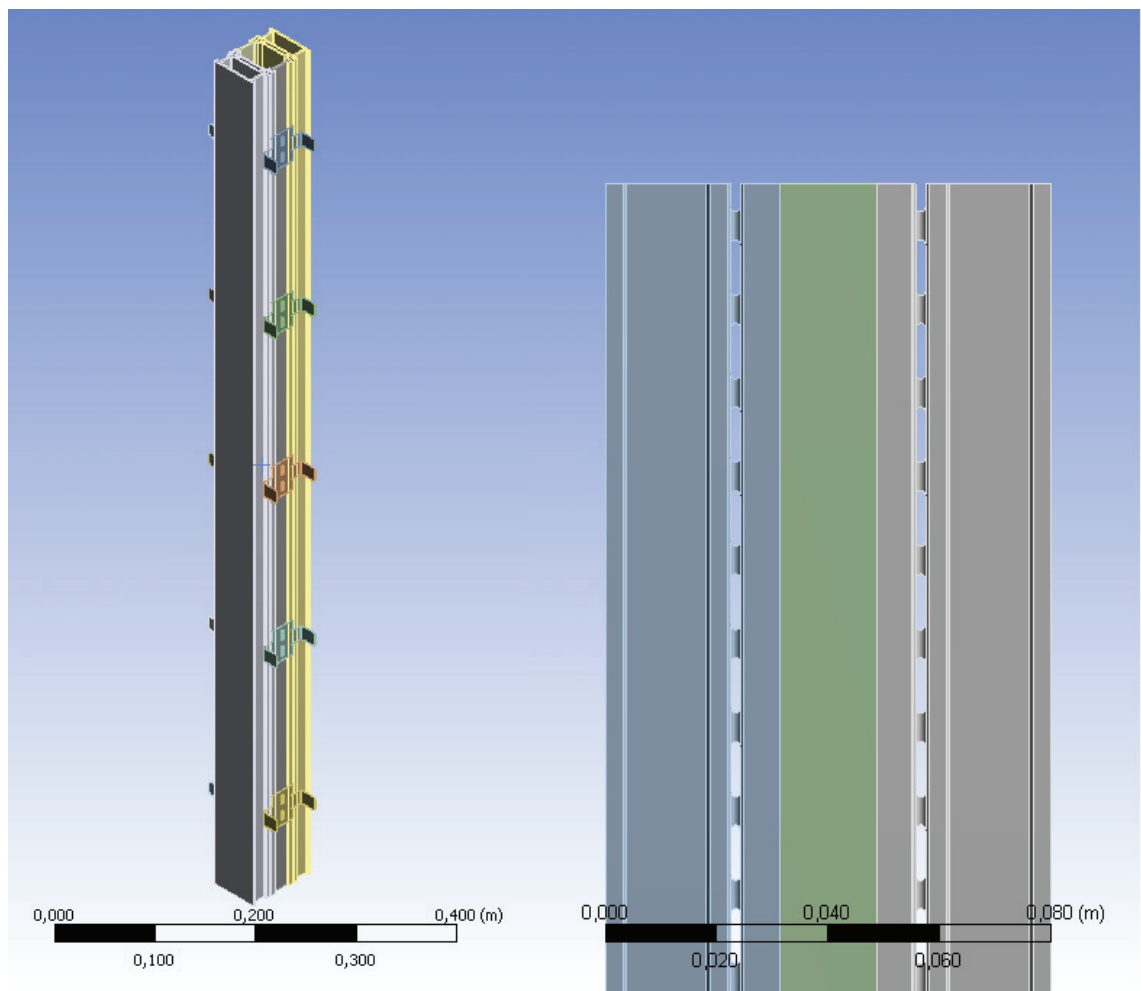
Työn kohteena olevalle palo-ovijärjestelmälle on aikaisemmin tehdyissä tuotekehitysprojekteissa tehty tutkimuksia, joiden avulla on pyritty parantamaan järjestelmän eristävyyttä polttotesteissä. Tutkimukset tehtiin käytännön polttokokeilla, jolloin menetelmien toiminnallisuus saatiin selvitettyä, mutta varsinaista selvää syytä tuloksille ei tällä tavoin pystytty päättämään. Tämän työn laskennassa pyrittiinkin selvittämään tarkemmin mihin asioihin kyseisten tulosten muodostus perustui.

Aiemmissa tuotekehitysprojekteissa testattiin pituussuunnassa rei'itettyä profiilia, jonka rei'ityksen avulla pyrittiin pienentämään lämmönsiirtymisen poikkipinta-alaa, jolloin pystyttäisiin pienentämään alumiinin herkästä lämmönjohtumisesta aiheutuvia ongelmia. Rei'itys toteutettiin profiiliin pursotuksen jälkeen koneistuksen avulla, tekeillä sopivaan kohtaan pitkulaisia reikiä profiilin molemmin puolin profiilin pituussuunnassa. Nykyistä profiilimuotoa muutettiin mallinnuksen yhteydessä sen verran, että rei'itys pystyttiin toteuttamaan rakenteen muita ominaisuuksia, kuten liitospalojen ja kiinnikkeiden paikkoja muuttamatta. Käytännössä uudelleenmuotoilluissa profiileissa vain tiettyjen seinämien paikka siirtyi hieman, joten myös profiilin metripaino säilyi ennallaan alkuperäiseen profiiliin verrattuna.

Laskennan avulla haluttiin selvittää myös lasinkinnikkeiden vaikutus lämmönsiirtymisen suuruuteen profiilien uuninpuoleisesta puoliskosta kylmälle puolelle. Lämmönsiirtymisessä tahdottiin tutkia edellä mainittujen asioiden lisäksi pintakäsittelyn ja etenkin anodisoinnin vaikutusta profiilin lämpösäteilyn määrään. Suuren lämpösäteilyn

avulla voitaisiin mahdollisesti vaikuttaa profiilien kylmänpuolen pintalämpötilojen suuruuteen positiivisella tavalla ja saada niitä laskemaan.

Laskut työssä suoritettiin Ansys-ohjelman avulla. Laskuja varten määriteltiin Ansys:n materiaalikirjastoon käytettyjen aineiden lämmönjohtavuudet erikseen niille aineille, joille ei materiaaliarvoja kirjastosta valmiiksi löytynyt. Laskuissa profiilien kuvitellulle uuninpuoleiselle pinnalle määriteltiin vakiolämpötila, joka testin lopussa uunissa katsottiin olevan. Profiilien vastakkaiselle puolelle taas määriteltiin pinnan emissiivisyyden arvo pinnan lähettämän säteilytehon laskemista varten. Samalle pinnalle määriteltiin myös luonnollinen konvektio, joka jäähdyttää pinnan lämpötilaa. Luonnollisen konvektion laskemiseksi tuli antaa profiilin pinnalle konvektiin lämmönsiirtokerroin, jonka avulla ohjelma laskee pinnasta ympäröivään ilmaan luovutetun lämpötehon suuruuden. Kuvassa 3.1 on esitetty mallikuvia profiileista ja koonpanoista, joille lämmönsiirtolaskut suoritettiin.



Kuva 3.1. Ansys-ohjelmalla tehdyissä lämmönsiirtolaskuissa käytettyjä malleja. Vasemmalla alkuperäinen profiili, jossa lasinkinnikkeet ovat valmistusohjeiden mukaisella jaottelulla. Oikealla on sivukuva rei'itetystä profiilista.

Profiilin pinnan eri emissiviteetit saatiin kirjallisuudessa esitetyistä taulukoista [9]. Konvektiivisen lämmönsiirtokerroin arvo määriteltiin sopivaksi muokatun profiilirakenteen avulla iterointia hyväksi käyttäen. Polttotestin aikana tapahtuvaa alumiinin sulamista jäljennettiin poistamalla kokonaisesta profiilista uuninpuoleisesta profiilin-

puolikkaasta tietty osuus pois. Jäljelle jääneelle uuninpuoleiselle profiilipinnalle asetettiin aikaisempien tuotekehitysprojektien yhteydessä saaduista testituloksista uunin lopulämpötila. Tämän jälkeen konvektiivista lämmönsiirtokertoimen arvoa iteroitiin niin kauan, että profiilin kylmän puolen pintalämpötila vastasi testistä saatua pintalämpötilaa. Näin menettelemällä kokeellisesti haettuun konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arvoon sisällytettiin kuviteltujen profiilien täytteiden jäähdytyskyky, sillä ne selvästi vaikuttivat aikaisempien tuotekehitysprojektien testirakenteiden kylmän puolen pintalämpötiloihin, mutta niitä on vaikea lisätä laskuihin omana erillisenä muuttujana. Tästä syystä kyseisellä lämmönsiirtokertoimen arvolla ei ole käyttöä kuin tässä nimenomaisessa laskutapahtumassa.

Profiilien täytteistä tulevaa palonsuojauskykyä on hyvin hankalaa saada sisällytettyä laskuihin, eikä sitä tästä syystä oteta huomioon laskuissa. Toisaalta laskuja yksinkertaistettiin myös sillä tavalla, että profiilin sisään jäävien seinämien konvektio sekä seinämistä säteilyn avulla välittyvä energia jätetään huomioimatta. Näin ollen lämpö siirtyy profiilin sisäpinnalta ulkopinnalle ainoastaan johtumisen kautta.

3.3 Polttouunin rakentaminen

Osastoivien rakenteiden luokitus tehdään käytännössä aina polttokokeen avulla. Polttokokeiden suorittaminen täysikokoisilla rakenteilla ja kaikkine siihen kuuluvine osineen tarvitsee huomattavan paljon aikaa sekä resursseja, sillä osastoivat rakennusjärjestelmät ovat monimutkaisia rakenteeltaan sekä ovikokoonpanot työläitä rakentaa. Jos kuitenkin halutaan kerätä testaustietoa vain hyvin rajatulta alueelta ja vähäisten muuttujien vaikuttaessa testaukseen, on täysikokoisia polttokokeita turhan hidasta sekä lisäksi arvokasta toteuttaa. Jo pelkästään täysikokoisen uunin rakentaminen on suuri sijoitus, joten sen käyttöaste tulisi olla huomattavan korkea, jotta polttouuni kannattaisi rakentaa standardien määritelmien mukaiseksi.

Edellä mainituista syistä johtuen tässä työssä on tarkoituksena rakentaa standardiuuniin verrattuna paljon pienempi testausuuni polttokokeita varten. Pienemmän polttouunin avulla on helpompaa ja nopeampaa kerätä tietoa tarkkaan rajatulta alueelta, sillä testattavien elementtien rakenne on yksinkertaisempi sekä niihin vaikuttaa huomattavasti vähemmän hallitsemattomia muuttujia testauksen aikana kuin täydelliseen osastoivaan rakenteeseen.

3.3.1 Vaatimukset ja suorituskky

Polttouunin tarkoituksena on saada tuotettua vertailukelpoista tietoa mahdollisimman helposti ja erityisesti kokeiden toistettavuuden tulisi olla yksinkertaista. Ennen kaikkea polttouunilla tehtävien testien tulisi olla ehdottoman turvallisia suorittaa, sillä korkeat lämpötilat, räjähdysvaara ja tehokkaat laitteet nostavat riskitekijöitä automaattisesti korkeammalle tasolle. Jotta kokeiden toistettavuus olisi yksinkertaista, tulee lisäksi varmistua, että testeissä vallitsevien muuttujien määrä pysyy alhaisena. Muuttujien määrään pystytään vaikuttamaan esimerkiksi valitsemalla testattavien elementtien rakenne huo-

lella, pitämällä testiuunin ympäristön vaikutus tuloksiin vähäisenä sekä mahdollistamalla uunin sisälämpötilan ja muiden olosuhteiden hallitseminen helpoksi.

Pienen polttouunin suorituskyvystä haluttiin saada mahdollisimman hyvin poltostandardeissa määriteltyä uunia vastaava, jotta aikaisemmista tuotekehitysprojekteista saatua tietoa pystyttäisiin vertailemaan pienellä polttouunilla saatujen tietojen kanssa. Näin ollen uuniin haluttiin valita riittävän tehokas poltin, jolla päästäisiin vähintään 1000 °C:n lämpötiloihin saakka. Polttimen tehonsäädön tulisi myös olla mahdollista, jotta uunin lämpötila saataisiin noudattelemaan hyvällä tarkkuudella standardissa annettua lämpötilakäyrää.

Elementtien lämpöliikkeen vaikutusta tai siitä johtuvaa elementin taipumista ei testauksen yhteydessä tulla tarkastelemaan muuten kuin havainnot ylös kirjaamalla, joten tästä ei synny polttouunin toiminnoille lisävaatimuksia. Lisäksi painetta uunin sisällä ei tulla mittaamaan, mutta uunin rakennetta ja lämmöneristystä mietittäessä otetaan kuitenkin huomioon tarpeellinen korvausilman saanti sekä uunin sisäisen paineen hallinta, että polttouuni toimisi turvallisesti ja luotettavasti ilman räjähdysvaaraa.

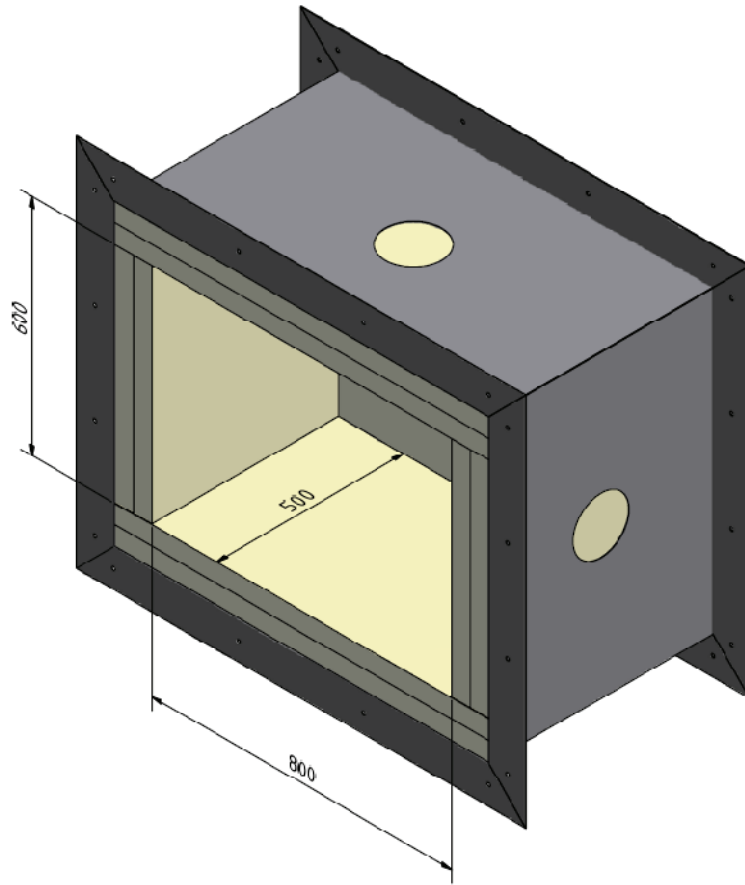
3.3.2 Sijoituspaikka ja runko

Polttouunin sijoituspaikka sekä sen välitön ympäristö valikoitiin siten, että polttouunin läheisyydessä olevat tavarat ovat palamattomia tai vähintäänkin paloa edistämättömiä materiaaleja. Edellä mainittujen asioiden varmistaminen oli helpointa ratkaista asettamalla polttouuni vakitukselle tulityöpaikalle. Uunia varten rakennettiin tästä syystä vakituinen tulityöpaikka, jonka läheisyydestä löytyvät palavat materiaalit suojattiin palonsuojalevyillä sekä seinien ja lattioiden raot tilkittiin palamattomalla eristemassalla. Eri-tyisen tärkeää oli valita polttouunin sijoituspaikaksi riittävän hyvin tuuletettu ja ilmastoitua paikka, jotta ympäristössä olisi riittävästi ilmaa sekä tilan normaaliin tarpeeseen että polttimen käytöstä aiheutuvaan lisäkulutukseen nähden.

Polttouunin runko tehtiin millimetrin vahvuisesta mustasta pellistä. Kyseinen materiaali valittiin siitä syystä, että teräspelti kestää alle 1000 °C lämpötiloja useita polttokertoja etenkin, kun se vielä eristetään sisäpuoleltaan palolta suojaavalla materiaalilla, jolloin uunin runko ei joudu kaikista suurimpien lämpötilojen rasittamaksi. Pellin pintakäsittely korroosiota vastaan olisi turhaa sillä uunin käyttölämpötilat nousevat kuitenkin korkeammaksi, kuin esimerkiksi sinkkikerros pellin pinnassa tulisi kestämään. Näin ollen pelti valittiin käsittelemättömänä, mutta käytön aikana sekä uunia varastoitaessa tulee huolehtia, ettei uunin runko pääse ruostumaan kosteuden takia.

Polttouunin runkoon on tarkoitus kiinnittää testattava elementti yhdelle uunin sivusta, joten yksi rungon seinistä jätetään kokonaan avonaiseksi. Runko (kuva 3.2) pystyttiin näin ollen valmistamaan kahdesta eri peltilevystä, joista toinen on täysin suora ja muodostaa polttouunin takaseinän. Toinen levyistä taas on taivutettu muodostamaan rungon muut seinämät sekä kiinnityslaipat testattavan elementin ja takaseinämän kiinnittämisen helpottamiseksi. Lisäksi uunin rungon nostamiseksi irti maasta, tehtiin uunin runkoon jalat neliöputkesta. Jalat tehtiin jo pelkästään paloturvallisista syistä, ettei uunin

alle jäävä lattiapinta joutuisi turhan suuren lämpörasituksen alaiseksi, mutta myös käytännöllisiin syihin vedoten. Jalkojen avulla uunia saataisiin nostettua hieman inhimillisemmälle korkeudelle testien aikaisia tarkasteluja varten sekä lisäksi helpottamaan uunin liikuttamista säilytyksen aikana.



Kuva 3.2. Polttouunin rungon 3D-malli. Uunin sisäosa on eristetty palovillalla.

Polttouunin sisämitoiksi muodostui 600 x 1000 x 800 mm (pituus x leveys x korkeus). Kun uunin sisälle laitetaan palovillasta tehty eristekerros rungon jokaisen seinämän suojaksi, pienenevät uunin sisämitat hieman, mutta silti uunin yhdelle sivulle jää vielä riittävästi tilaa kolmelle testikappaleelle kerrallaan poltettavaksi. Uuniin kiinnitettävät kolme testikappaletta tullaan sijoittamaan pystyyn sekä testielementin kiinnittämisen ja eristämisen helpottamiseksi asennetaan lisäksi elementin reunoille erilliset profiilit rakennetta tukemaan. Testielementin koko on hieman polttouunin suuaukkoa suurempi, jotta se pystytään kiinnittämään tukevammin ja tiiviimmin uunin sivulle. Kuvassa 3.3 on näytetty testielementin kiinnitys polttouuniin, jossa apuna käytetään erillistä kiinnityskehää. Testielementti tiivistetään reunoiltaan ja testielementin päältä palovillan avulla. Lisäksi testielementti kiilataan tukevasti uunin suuaukkoa vasten kiinnityskehää apuna käyttäen.



Kuva 3.3. Testielementin asennus polttouuniin kiinnityskehän avulla.

3.3.3 Polttimet ja turvalaitteet

Uunin polttimia valittaessa tärkeimpänä kriteerinä suorituskyvylle oli noin $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilan saavuttaminen sekä toiminnallisuuden puolella lämpötilan säätämisen mahdollisuus. Suuntaa-antava laskelma uunin teholle saatiin selvittämällä riittävä lämpötehon määrä, kun uunin sisälämpötilaksi halutaan $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, kun lämpöhäviöiden suuruus arvioitiin parhaimman saatavilla olevan tiedon mukaan. Laskennan avulla saatu tulos kertoi, että valittavan polttimen tulisi olla vähintään noin 40 kW :n tehoinen poltin.

Uunin polttimiksi alkuun suunniteltiin sähköllä toimivia lämpöpuhaltimia. Lämpöpuhaltimien suurena etuna olisi niiden säädeltävyyden helppous sekä käytön turvallisuus. Toisaalta lämpöpuhaltimien poissulkevana heikkoutena on niiden maksimilämpötila, jonka ne edes teoriassa pystyvät saavuttamaan. Kyseinen maksimilämpötila jää vain noin $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ tuntumaan, joten lämpöpuhaltimia ei pystytä hyödyntämään polttouunin yhteydessä kuin mahdollisesti peruslämmittiminä tai uunin lämpötilan tarkemman säädettävyyden parantamisessa.

Riittävä lämpötila saavutetaan sen sijaan nestekaasupolttimien avulla. Nestekaasu (LPG, Liquefied Petroleum Gas) nimeä käytetään sekä propaanista että butaanista, mutta Suomessa käytössä olevissa perinteisissä nestekaasupulloissa on yleensä vain propaania. Retkikeitinten pienet kaasusäiliöt sisältävät taas joko butaania tai propaanin ja butaanin sekoitusta. Propaani ja butaani ovat molemmat alkaaneja eli suoraketjuisia hiilivetyjä. Niiden suurimmat erot tulevat esiin kyseisten aineiden moolimassoissa sekä kiehumispisteissä. Butaanin moolimassa on suurempi kuin propaanin, joten sama määrä

butaania vapauttaa palaessaan hieman enemmän lämpöenergiaa. Toisaalta puhtaan propanin kiehumispiste ($-42\text{ }^{\circ}\text{C}$) on paljon alhaisempi kuin butaanin ($-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), joten se toimii paremmin esimerkiksi talvella pienessä pakkasessa. Nestekaasu on yksi öljynjalostuksen rinnalla saaduista tuotteista. Nestekaasu voi olla myös vähän epäpuhtauksia sisältävää luonnonkaasua, jota saadaan kaasukentiltä. [13] [14]

Nestekaasu, joka aikaisemmin tunnettiin myös kansankielisellä nimellä kosaani, pysyy kaasupullossa nestemäisessä muodossa paineen ansiosta. Kun nestekaasua vapautetaan normaaliin ilmanpaineeseen, muuttuu se kaasumaiseksi. Kaasu on ilmaa painavampaa ja hajutonta. Nestekaasun hajuttomuuden takia Suomessa nestekaasun sekaan lisätään kaasulle ominaiseksi muodostunutta hajua, jotta tahaton kaasun vapautuminen ilmaan olisi mahdollista havaita riittävän ajoissa ennen suurta kaasun leimahdus tai räjähdysvaaraa. Nestekaasuvuotojen havaitseminen on turvallisuuden kannalta erittäin tärkeää, sillä nestekaasu on ilmaan sekoitettuna erittäin helposti syttyvää ja sisätiloissa nestekaasu on jopa räjähdysvaarallista. [13] [15]

Nestekaasua käytetään sekä matala- että korkeapaineisena, joista matalapainejärjestelmissä paine on enintään 30 mbar :ia ja korkeapainejärjestelmissä jopa 25 bar :ia. Matalapaineista nestekaasua käytetään esimerkiksi kotitalouksien grilleissä ja matkailuautojen kaasuliesissä. Korkeapainejärjestelmiin törmätään taas eniten teollisuudessa erilaisten suurtehopolttimien yhteydessä. Suurin ero edellä mainituilla järjestelmillä tulee vastaan polttimista saatavista tehoista. Luonnollisesti korkeapainejärjestelmän avulla saadaan suurempia tehoja aikaiseksi, sillä korkeapaineinen kaasunsyöttö mahdollistaa suuremman kaasuvirran polttamisen. Matalapainejärjestelmissä päästään aina noin 25 kW :n poltintehoihin asti, kun taas korkeapainejärjestelmien poltintehot voivat nousta selvästi päälle 100 kW :iin. [16]

Nestekaasu vaatii palaakseen huomattavan määrän happea. Yksi kilogramma nestekaasua vaatii täydelliseen palamiseen jopa 10 kilogrammaa ilmaa [14]. Matalapainejärjestelmissä riittävä määrä happea polttimen käyttöön saadaan yleensä ympäröivästä ilmasta. Korkeapainejärjestelmissä taas joudutaan erilaisin keinoin avustamaan poltinta, jotta palamisessa olisi mukana tarvittavasti happea. Yksinkertainen keino edistää polttimen hapensaantia on tehdä erillinen kaasutila ennen polttimen päätä, jossa ilma ja nestekaasu pääsevät kunnolla sekoittumaan ennen kaasuseoksen syttymistä. Kaasun nopea virtaus polttimen kaasutilassa aiheuttaa imun polttimen takaosaan, josta ilma pääsee sisään kaasutilaan. Näin ollen tämänkin tyyppisissä polttimissa palamiseen tarvittava ilma saadaan edelleen pelkästään ympäristöstä, eikä ilmaa tarvitse erikseen syöttää polttimeen. Kyseisillä polttimilla päästään noin $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloihin asti.

Polttimen hapensaantia voidaan parantaa myös syöttämällä kaasutilaan ilmaa, jolloin polttimeen tulee oma liitäntänsä paineilmaletkulle. Tällä tavoin polttimelle pystytään syöttämään huomattavasti suurempi määrä ilmaa ja siis luonnollisesti myös enemmän happea palamisen tehostamiseksi. Suurempi happimäärä taas mahdollistaa kaasunsyötön kasvattamisen, jolloin pystytään polttamaan suurempi kaasuvirta kuin tavallisella polttimella. Lisäksi paineilma-avusteisella polttimella päästään yli $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloihin saakka tehostuneen polttoilman saannin ja kaasujen sekoittumisen myötä.

Polttimen liekin lämpötilan ja suuremman kaasunsyötön avulla paineilma/kaasu - polttimien teho nousee tästä syystä tavallista poltinta korkeammaksi aina yli 100 kW:iin asti.

Kolmantena vaihtoehtona riittävän hapen saamiselle polttimeen on syöttää paineilman sijasta puhdasta happea poltinjärjestelmään. Tällöin päästään polttimen liekin lämpötiloissa jopa lämpötilaan 2600 °C. Polttimen liekin korkea lämpötila selittyy sillä, että pelkän hapen kanssa nestekaasu palaa huomattavasti puhtaammin kuin ilman kanssa, koska ilma sisältää vain noin viidesosan verran massastaan palamisessa tarvittavaa happea. Happi/kaasu -polttimia käytetäänkin yleensä silloin, kun tarvitaan erittäin kuumaa ja tarkkaa pistemäistä liekkiä, kuten esimerkiksi polttoleikkauksessa. Tällaisten polttimien kokonaisteho jää silloin suhteellisen pieneksi verrattuna muihin edellä esiteltyihin polttimiin nähden, sillä palamisessa käytetyn kaasun kulutus on pieni. Muuten teollisuudessa happi/kaasu -polttimia käytetään vasta, kun tarvittavan lämpötilan korkeus sitä vaatii. Teollisuusuunien, kuten raskasmetallien sulattojen ja valimojen polttimilta saadut tehot nousevat vielä huomattavan paljon korkeammiksi kuin perinteisillä tai paineilma-avusteisilla nestekaasupolttimilla, riippuen pelkästään polttimelle syötetyn kaasun ja hapen kulutuksesta. Happi/kaasu -polttimia käytettäessä on myös hyvä muistaa aikaisemmin mainittu hapen kulutuksen nestekaasun määrä puhtaassa palamisessa, joka tarkoittaa, että perinteinen 11 kg:n kaasupullo vaatii seurakseen yli 100 kg:n happisäiliön.

Yksi erittäin tärkeä asia polttouunin rakentamisessa turvallisuuden kannalta oli, että valitusta polttimesta löytyy liekinvarmistusjärjestelmä. Tämä asia selittyy yksinkertaisesti sillä, että nestekaasun itsesyttymisraja on jo noin 450 °C tietämällä. Näin ollen missään nimessä testipolton aikana ei saa esiintyä sellaista tilannetta, että liekki polttimessa syystä tai toisesta sammuu, mutta kaasunsyöttö polttimelle kuitenkin yhä jatkuu. Kyseinen tapahtuma aiheuttaisi valtaisan turvallisuusrikin, sillä pienen uunin sisälle suurella nopeudella ja paineella kertyvä kaasu voisi syttyä ja räjähtää pienestäkin kipinästä tai pahimmassa tilanteessa itsestään, jolloin uunista muodostuisi eräänlainen räjähtävä kaasupommi.

Pelkän kaasun avulla toimivan polttimen liekinvarmistusjärjestelmä on kohtuullisen yksinkertaista toteuttaa. Polttimen suulle ei tarvitse asentaa kuin polttimen liekin lämpötilan kestävä lämpötila-anturi, joka on yhteydessä ennen poltinta sijaitsevaan sulkuventtiiliin. Toimintaperiaatteena järjestelmällä on se, että anturin avulla tarkkaillaan liekin lämpötilaa jatkuvasti. Jos liekki pääsee sammumaan, havaitsee anturi lämpötilan laskun tietyn kynnyksarvon alapuolelle ja tämän seurauksena sulkuventtiili katkaisee kaasunsyötön polttimelle. Sulkuventtiilistä löytyy erillinen ohituskytkin, jonka avulla poltin saadaan sytytettyä ja lämpötila nostettua yli edellä mainitun kynnyksarvon. [16]

Paineilman ja hapen kanssa toimivien polttimien kanssa liekinvarmistusjärjestelmä ei ole aivan yhtä yksinkertainen. Kyseisten polttimien liekkien lämpötila on parhaimmillaan niin korkea, etteivät normaalit lämpötila-anturit kestäisi sellaista kuumuutta. Näin ollen näiden kahden polttimen kohdalla liekinvarmistusjärjestelmään tulisi lisätä apupoltin lämpötila-anturin ja sulkuventtiilin lisäksi. Apupoltin sijoitettaisiin poltti-

men suulle kohtisuoraan asentoon polttimeen nähden. Järjestelmän ideana on, että apupolttimen avulla pidetään itse pääpolttimen liekkiä kokoajan päällä. Apupolttimen liekkiä taas tarkkaillaan anturin avulla vastaavaan tapaan kuin aikaisemmin perinteisemmän kaasupolttimen yhteydessä, jolloin apupolttimen liekin sammuttua, katkaistaan sulkuventtiilillä molemmille polttimille tuleva kaasunsyöttö. [16]

Uuniin valittavien polttimien lukumäärään vaikuttaa voimassa oleva lainsäädäntö. Suomessa on räjähdysvaarallisille aineille säädetty laki, jonka piiriin myös nestekaasu kuuluu. Nestekaasulle on vielä tarkemmin määriteltä oma nestekaasuasetuksensa (26.7.1993/711), jonka yhtenä kohtana käsitellään nestekaasulaitteiden asennusta. Asetuksen mukaan kiinteiden nestekaasulaitteiden asennuksen saa suorittaa vain hyväksytty kaasuasennusliike. Asetuksessa mainitaan kuitenkin, että pienkohdeasennuksissa, joissa käytetään vain esivalmistettuja laitteidenosia, ei järjestelmän kasaamiseen tarvita virallisen kaasuasentajan pätevyyttä. Toisaalta asetuksessa sanotaan myös, että kaasusäiliöltä tulevan virtaustien haaroituksen kahteen osaan saa tehdä ainoastaan putkien avulla. Tästä syystä kahden tai useamman polttimen asennukseen vaaditaan aina putkiasennusta, jos halutaan käyttää vain yhtä kaasupulloa. Putkia ei kuitenkaan pystytä valmistamaan etukäteen, vaan putkiasennukset toteutetaan käytännössä aina muun järjestelmän kasaamisen yhteydessä kiinteinä asennuksina, jolloin tällaiset järjestelmät vaativat hyväksytyn kaasuasentajan palveluita niiden toteuttamisessa. [17]

Uunin polttimeksi valittiin 1½” poltinpäällä varustettu soihtupoltin, jonka maksimaaliseksi poltintehoksi ilmoitetaan 90 kW kaasun 4 bar:n syöttöpaineella. Valittu poltin kiinnitysrunkoineen on esitetty kuvassa 3.4. Soihtupoltin toimitetaan varustettuna säätöventtiilillä, painemittarilla sekä liekinseurantajärjestelmällä, joka toimii lämpötilanturin ja sulkuventtiilin avulla. Poltinkokoonpanoon liitetään letkun välityksellä lisäksi letkurikkoventtiili ja tavalliseen 11 kg:n kaasupulloon kierreliitännällä yhteensopiva paineenalennusventtiili. Letkurikkoventtiilillä varmistetaan, että letkun rikkoutuessa ei aiheudu vaaratilannetta ja paineenalennusventtiilin avulla pystytään kaasun syöttöpainetta säätämään halutulle tasolle.

Lämpötilan säätely pystytään toteuttamaan testaustilanteessa kolmella eri tavalla. Polttimen kaasutilan juuressa olevalla laipalla voidaan säädellä kaasutilaan virtaavan ilman määrää avaamalla tai sulkemalla kyseistä virtaustietä. Mitä enemmän kaasutilaan virtaa ilmaa sitä paremmin ja tehokkaammin kaasua palaa. Oikea ilmamäärän sekoittuminen kaasuun on erittäin tärkeää, jotta liekki palaa varmasti. Jos poltin saa liian vähän ilmaa palamiseen eli polttimen juuressa oleva laippa on turhan paljon kiinni, on vaarana polttimen liekin sammuminen. Polttimen yhteydessä olevalla säätöventtiilillä taas kyetään rajoittamaan polttimeen virtaavan kaasun määrää, jolloin pienellä virtauksella poltettavan kaasun määrä on vähäisempi ja tällöin myös polttimen teho on pienempi. Edellä mainitut säätötavat ovat kuitenkin varsin epätarkkoja ja kaikista tarkin lämpötilan säätö pystytään toteuttamaan kaasupulloon liitetyllä paineenalennusventtiilillä. Näin ollen paineenalennusventtiiliä käytetään lämpötilan hienosäätöön ja muilla säätötavoilla ainoastaan haetaan lämpötilan arvo karkeasti oikealle tasolle.



Kuva 3.4. Testiuunin poltin säätö- ja turvavarusteineen.

3.3.4 Huuva ja uunin pakoputki

Testielementtien polton seurauksena ilmaan vapautuu tummia palokaasuja lähinnä tiivisteiden palaessa. Näiden likaavien palokaasujen ja myös muiden poltossa syntyvien kaasujen hallitun poistamisen avuksi polttouunin päälle asennettiin suurehko huuva, joka on esitetty kuvassa 3.5. Huuvan suuaukon leveys on 2 m ja pituus 1,5 m sekä korkeutta huuvalla on 1,2 m. Huuvasta haluttiin saada liikuteltava, jotta se voidaan käyttökertojen välissä siirtää pois tieltä. Tästä syystä huuvalle rakennettiin kiskot, joiden avulla huuvaa voidaan tuoda ulommaksi seinästä. Huuvan korkeussäätö toimii kiskoihin asennettujen kiinnitysketjujen pituutta muuttamalla. Huuvan paikan muunneltavuudesta johtuen ei huuvaan voitu asentaa kokonaan kiinteää putkistoa. Tästä syystä putkiston loppuosa tehtiin silikonista valmistetusta, metallispiraalilla vahvistetusta haitariputkesta, jonka pituus muuttuu huuvan paikan mukaan sopivaksi.

Koska palokaasut ovat yleensä ympäristöä lämpimämpiä, muodostavat ne luonnollisen konvektion ansiosta virtauksen putkistossa ylöspäin. Putkiston asennuksessa pidettiin lisäksi huolta, että putkisto johtaa koko ajan ylöspäin, kulkee lyhintä mahdollista reittiä ja tekee mahdollisimman vähän mutkia. Kuitenkin huuvan riittävän imun varmistamiseksi, asennettiin putkistoon vielä erillinen kanavapuhallin. Kanavapuhaltimen asennus oli helppoa, sillä se kiinnitettiin suoraan huuvasta lähtevän putkiston väliin ja tarvitsi ainoastaan ylimääräisten sähköjohtojen vetämisen sekä erillisen katkaisijan asentamisen.



Kuva 3.5. Polttouunin huuva kiskoineen ja putkistoineen.

Polttouunin sijoituspaikan kohdalta, tilan katosta löytyi jo entuudestaan onkalo, jonka päässä on katolle asennettuna huippuimuri. Vetämällä huuven putkiston loppupää suoraan kyseiseen onkaloon, välttyttiin ylimääräisten läpivientien tekemiseltä tilan seiniin tai kattoon. Lisäksi huippuimurin avulla pystytään voimistamaan huuven putkistossa vallitsevaa imua ja tehostamaan uunissa muodostuvien palokaasujen hallittua poistoa.

Ensimmäisenä ajatuksena uunin sisälle muodostuvan paineen sekä palokaasujen poistamiseksi oli tehdä uuniin lyhyt savupiippu, joka ulottuisi ainoastaan huuven suulle, mutta ei huuven putkistoon asti. Tarkoituksena oli, että kuumat savukaasut sekoittuisivat kanavapuhaltimen ja huippuimurin tuottaman imun seurauksena suureen määrään ympäristön viileää ilmaa, jolloin savukaasut jäähtyisivät riittävästi putkistoon mennessään.

Savukaasujen riittävä jäähtyminen ennen huuven putkistoon menemistä oli kahdestakin syystä tärkeää. Ensinnäkin putkiston silikonihaitariosuus sekä kanavapuhaltimen ja huippuimurin muoviosat eivät kestä kuin korkeintaan 100 °C lämpötiloja. Kanavapuhaltimien ja huippuimurien ensisijaiset käyttökohteet ovat rakennusten ilmastoinneissa, eikä kuumien savukaasujen poistamisessa. Toinen oikeastaan vielä tärkeämpi syy kuumien savukaasujen jäähtymiselle on tulipalon uhka välikatolla, jonka läpi huuven putkiston läpi kulkevat savukaasut menevät. Kuumat savukaasut palolta suojaamattomalla välikatolla ovat sinänsä jo paloturvallisuus riski, jota ei paranna se asia, että

uunin sijoituspaikkana toimiva rakennus on aikaisemmin toiminut pulverimaalaamona. Näin ollen on hyvin todennäköistä epäillä, että välikatolla sekä huippumurin yhteydessä saattaa olla herkästi syttyviä maalipölyjämiä tai muuten vain hyvin palavia aineita. Siksi onkin ehdottoman tärkeää, ettei välikatolle pääse kuumia savukaasuja missään vaiheessa polttouunia käytettäessä.

Polttouunin ensimmäisten käyttökokeiden tarkoituksena oli testata polttimeen käyttöä yleisellä tasolla sekä tarkastella huuuvan putkistoon menevien kaasujen lämpötiloja. Heti ensimmäisen testin alussa havaittiin, että huuuvan putkistoon menevien savukaasujen lämpötila nousi lähes heti yli lämpötilan $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ vaikka uunin sisälämpötila ei ollut noussut kuin vasta lämpötilaan $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ensimmäinen testi jouduttiinkin lopettamaan heti alkuunsa laitteiden rikkoutumisuhan takia ja seuraavaksi alettiin selvittää tehokkaita keinoja palokaasujen viilentämiseksi.

Ratkaisuksi tähän ilmenneeseen ongelmaan koetettiin savukaasujen nestejäähdytystä. Nestejäähdytys toteutettiin tekemällä uunin savupiippuun lyhyt vaakasuora osuus, jonka päähän liitettiin pieni suutin jäähdytysnesteen ruiskuttamista varten. Mitä hienojakoisempaa nestepilveä suuttimella pystytään pakoputken sisään muodostamaan sitä tehokkaampi palokaasujen jäähdytys saadaan aikaiseksi. Tämä ilmiö selittyy sillä, että hienojakoisessa sumupilvessä nestepisaroiden yhteenlaskettu pinta-ala on huomattavasti suurempi kuin suurien pisaroiden tapauksessa. Näin ollen hienojakoisessa nestesumussa suurempi määrä kuumia palokaasuja on yhtä aikaa kosketuksissa nesteen kanssa. Tällöin myös suurempi määrä palokaasun sisältämästä lämpöenergiasta sitoutuu nesteeseen ja kuluu veden faasimuunnoksessa nesteestä höyryksi.

Nestejäähdytyksessä tarvittava suutin ja säädettävä kahvaosuus pystyttiin hyödyntämään kannettavasta paineruiskusta, jota yleisemmin käytetään tuholaismyrkkujen tai pesuaineiden sumuttamisessa. Suutin muodostaa hieman rengasmaisen, mutta tasaisesti leviävän ja hyvin pieniä pisaroita sumuttavan nestepilven. Suutinta valittaessa täytyi huomioida se, että suuttimen valmistusmateriaali on metalli, sillä pakoputken sisällä lämpötilat nousevat muovien sulamispisteen yläpuolelle. Valitun paineruiskun suutin on valmistettu messingistä, joka suuttimen läpikulkevan nesteen auttamana kestää hyvin pakoputken sisällä esiintyviä lämpötiloja.

Jäähdytyksessä käytettäväksi nesteeksi valittiin vesi, sillä valittu suutin ja sen kahvaosuus oli helppoa liittää suoraan vesijohtoverkkoon. Vesijohtoverkon avulla taattiin lisäksi jatkuva sekä riittävä tilavuusvirta koko testausperiodin ajaksi. Vesi muutenkin ominaisuuksiltaan oli luonnollinen valinta jäähdytysnesteeksi, koska se on myrkytöntä, halpaa ja sitä on helposti saatavilla. Vesijohtoverkon kautta saatiin myös suoraan muodostettua riittävä paineistus nesteelle suuttimen kunnollista sumutustoimintaa varten.

Yhtenä tärkeänä osana vesijäähdytyksen toimivuutta oli suuttimen suuntaus oikein pakoputkistossa. Suuntauksen avulla pyrittiin vesisumu kohdistamaan koko pakoputken poikkileikkauksen pinta-alalle. Tällöin varmistettiin, ettei miltään alueelta pääsyt kuumia palokaasuja kulkeutumaan pakoputken läpi, vaan kaikki kaasut altistuisivat jäähdyttävän vesisumun vaikutukselle. Lisäksi vesisumu suunnattiin toimimaan pako-

putken suoran osuuden suuntaisesti, jotta vesisumu ehditsi jäädyttää mahdollisimman pitkän aikaa palokaasuja. Pakoputken suoran osuuden loppuun tehtiin vielä reikä ylimääräisen veden hallitulle poistamiselle. Poistoreiän kautta pystyttiin myös seuraamaan, että pakoputkistoon varmasti syötetään riittävästi jäädytysvettä.

Vesijäähdytyksen avulla saatiin kuitenkin viilennettyä huuvan putkistoon menevien palokaasujen lämpötilaa ainoastaan välttävästi. Vesijäähdytyksen kanssa voitiin uunin sisälämpötila nostaa noin lämpötilaan 950 °C, mutta tällöinkin huuvaan nousevien savukaasujen lämpötila oli vielä yli 100 °C. Näin ollen vesijäähdytyskään ei ollut riittävän tehokas palokaasujen viilentäjä ja tämäkin uunin toimintaa simuloiva testi jouduttiin keskeyttämään ennen aikojaan.

Vesijäähditys toi mukanaan myös uusia ongelmia uunin ja polttimen toimintaan liittyen. Nimittäin ilman vesijäähdytysjärjestelmää tehdyssä käyttötestissä uunin pakoputkessa ilma virtasi hyvin uunin sisäpuolen ja muun ympäristön suuren lämpötilaeron takia. Vesijäähdytyksen toimiessa kunnollisesti muodostui pakoputkeen eräänlainen ilman ja vesisumun yhdessä muodostama tulppa. Tämä ilmiö johtui siitä, että kuumien palokaasujen jäähtyessä kaasun tilavuus pienenee huomattavasti ja kaasun virtausnopeus pakoputkessa laskee. Myös vesisumu itsessään aiheuttaa virtausvastusta palokaasuille, joten kaasujen virtaus heikkeni myös tätä kautta. Edellä mainituista syistä johtuen pakoputki ei enää vetänytkaan toivotulla tavalla ja polttimen tehonsyöttöä kasvatettaessa, pyrki uunin sisälle muodostuva paine poistumaan polttimelle sekä korvausilman saannille tarkoitetusta reiästä. Tämä aiheutti sen, että polttimen liekit eivät enää suuntautuneetkaan tarkoitetulla tavalla polttimesta pois päin, vaan rupesivat kuumentamaan polttimen suutinosaa. Poltin rupesi toimimaan huonosti ja epävarmalla tavalla turvallisuuden kannalta, koska takaisin iskeytyvät liekit estivät suuttimen riittävän korvausilman saannin,

Lopulta toimivaksi ratkaisuksi palokaasujen turvalliseksi poistamiseksi osoittautui lyhyt pakoputkisto. Pakoputkiston avulla saatiin varmistettua kuumien kaasujen poisto varmimmalla ja turvallisimmalla tavalla. Pakoputkisto rakennettiin jatkumaan suoraan uunin katolta ulkoilmaan ulottuvaksi ja tästä syystä sille oli tehtävä tilan ulkoseinään reikä. Reiästä tehtiin mahdollisimman eristetty ja tiivis, ettei reiän ja pakoputken välistä pääse virtaamaan kylmää ilmaa ja kosteutta ulkoapäin sisälle. Eristyksessä tuli kuitenkin huomioda kuumasta pakoputkesta mahdollisesti aiheutuva paloturvallisuusriski, joka hoidettiin kuntoon riittävällä putken palosuojauksella palamattoman eristemassan ja palovillan avulla. Kuvasta 3.6 nähdään polttouunin valmis pakoputki kiinnityksineen ja eri osineen.



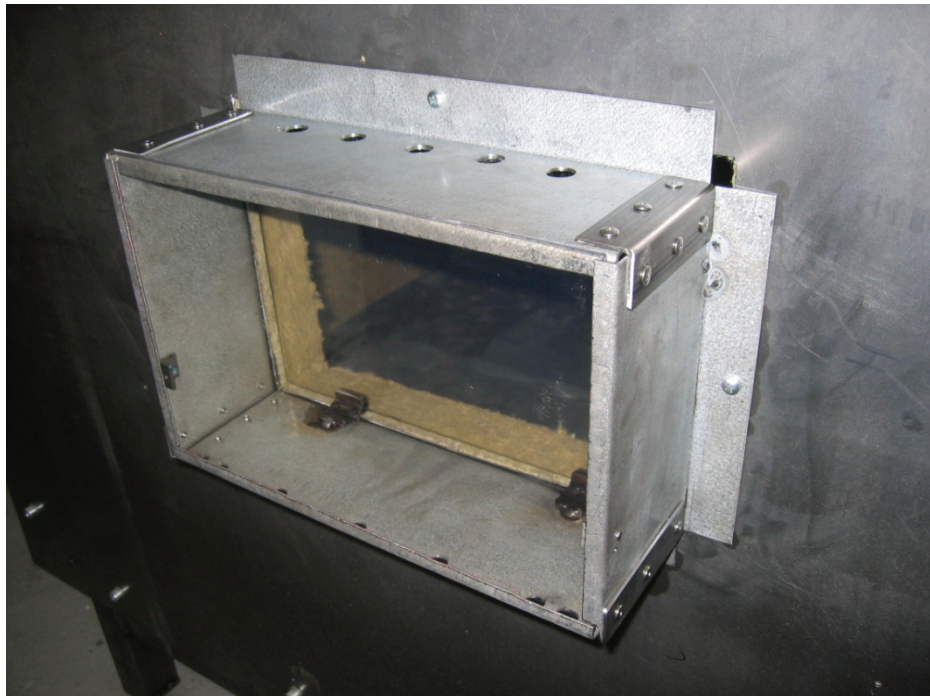
Kuva 3.6. Polttouunin pakoputki sekä huuven savukaasujen poistoputkisto, jonka keskellä on kanavapuhallin.

Koska uuni on liikuteltava, ei uunin pakoputkestakaan voinut tehdä kovin kiinteää. Näin ollen pakoputken alkuosa tehtiin helposti irrotettavaksi, joka on yksinkertaista kasata ja purkaa käytön mukaan. Alkuosan kiinnitys toteutettiin sitomalla pakoputken yläpää metallisella tukipannalla kiinni huuven kiskorakenteeseen. Pakoputken alkuosan uuninpuoleiseen päähän taas asennettiin tukijalat uunin katolle pitämään pakoputkea tukevasti paikallaan. Pakoputken loppuosa tehtiin kiinteänä ja se asennettiin pysyvästi kiinni seinään sekä huuven kiskoihin ja putkistoon. Toteuttamalla pakoputkiston loppu- ja aluosat erikokoisista ilmastointiputkista, pystyttiin pakoputkessa kulkevien kaasujen lämpötilaa hieman laskemaan ylä- ja alaosan liittymäkohdasta pakoputken sisään virtaavan korvausilman avulla.

Ulos asti johtavan pakoputken avulla ja ilman vesijäähdytystä pystyttiin uunin lämpötilaa seuraavassa testissä nostamaan lähes lämpötilaan 1000 °C, eikä huuven putkistoon pääsevien kaasujen lämpötila noussut siltikään kuin maksimissaan lämpötilaan 32 °C. Pakoputken loppuosan alkupäästä kaasujen lämpötilaksi mitattiin ainoastaan noin 150 °C, joten ulkoilmaan päästessään lämpötilan katsottiin laskeneen turvallisen alhaiseksi tulipalon riskin kannalta. Näin ollen edellä esitetyllä konstruktiolla palokaasujen poiston puolesta uunia voidaan alkaa käyttämään turvallisesti ilman laitteiden rikkoutumisen tai tulipalon syttymisen vaaraa.

3.4 Elementtien testaus ja tiedonkeruu

Yhtenä olennaisena osana kaikkea testausta on tiedon kerääminen talteen, jotta testejä voidaan tarkemmin vertailla keskenään ja lisäksi pystytään analysoimaan saatua informaatiota paremmin. Tämän työn tiimoilta tiedon kerääminen toteutetaan eri lämpötilojen seurannan avulla sekä mahdollisimman kattavien havaintojen tekemisellä polttotestauksen aikana. Seurannassa olevia lämpötiloja ovat uunin sisälämpötila, ympäristön lämpötila sekä jokaisen testikappaleen kylmän puolen pintalämpötila. Havaintojen osalta testauksen aikana kirjataan sekä kuvataan kaikki selvästi erottuvat ilmiöt ylös yhdessä ilmiöiden tapahtuma-ajan kanssa. Pääasiassa havaintoja tehdään uunin takaseinään rakennetun ja kuvassa 3.7 esitetyn katseluaukon kautta eli lähinnä testauksessa ollaan kiinnostuneita palonpuolella tapahtuvista asioista. Lisäksi kirjataan myös kaikki uunin ulkopuolella tapahtuvat asiat, sillä niillä voi olla vaikutusta testeissä saatuihin tuloksiin tavalla tai toisella.



Kuva 3.7. Uunin takaseinästä löytyvä katseluaukko polton aikaisten havaintojen tekemiseen.

Lämpötilojen seurantaan hankittiin testejä varten antureita, joilla edellä mainitut lämpötilat pystytään mittaamaan. Lämpötila-antureiden osalta suurimmat vaatimukset kohdistuvat uunin sisälämpötilan anturiin, jonka tulee kestää yli 1000 °C lämpötiloja sekä anturin toleranssiväli ei saa kasvaa liian suureksi kuumillakaan mittausalueilla. Pintalämpötilan mittauksessa käytettävien anturien kohdalla tärkein kriteeri on, että ne pystytään kiinnittämään tukevasti ja varmasti testikappaleiden pintaan.

Antureiden lukemien tallentamiseen käytetään dataloggeria, jollainen oli hankittuna yrityksen käyttöön muuhun tarkoitukseen, mutta jota pystytään hyödyntämään myös tässä projektissa. Dataloggerista löytyy tilaa kuudelle termoelementtianturille, joissa on K-tyyppin miniliitin, joten sillä on mahdollista tallentaa kaikkien antureiden tiedot yhdellä kertaa. Tiedot tallentuvat dataloggerin muistiin, josta ne pystytään siirtä-

mään sarjaportin välityksellä tietokoneelle. Antureista saatu tieto vaatii oman ohjelman, että niitä voidaan tarkastella tietokoneella. Samaisella ohjelmalla pystytään tarkastelemaan antureista saatavaa tietoa reaaliaikaisesti, jolloin mahdollistuu myös testauksen aikainen lämpötilojen tarkastelu.

Testauksessa käytettäviksi antureiksi valittiin dataloggerin kanssa yhteensopivat termoelementtianturit K-tyypin miniliittimillä. Termoelementeissä kulkee kaksi johdinta rinnakkain mittalaitteeseen kiinni tulevan liitinpään ja itse mitattavan pään välillä. Termoelementtiantureiden toiminta perustuu lämpösähköiseen ilmiöön, jossa liitinpään johtimien välille syntyy jännite-ero. Jännite-ero syntyy, kun yksittäisen johtimen päät ovat eri lämpötiloissa, jolloin johtimen lämpimään päähän muodostuu pienempi elektronitiheys kuin sen kylmään päähän. Jos termoelementissä kulkisi kaksi samasta materiaalista valmistettua johdinta rinnakkain, ei kuitenkaan liitinpäähän välittyisi tietoa jännite-erosta, sillä liitinpään johtimet olisivat tällöin samassa potentiaalissa. Näin ollen termoelementin johtimet valmistetaan kahdesta eri materiaalista, jolloin liitinpään johtimista voidaan sopivalla mittalaitteella mitata jännite-ero. Tämä jännite-ero voidaan taas muuttaa lämpötilaksi, kun tunnetaan johtimissa käytettyjen materiaalien riippuvuus jännitteen ja lämpötilan suhteen.

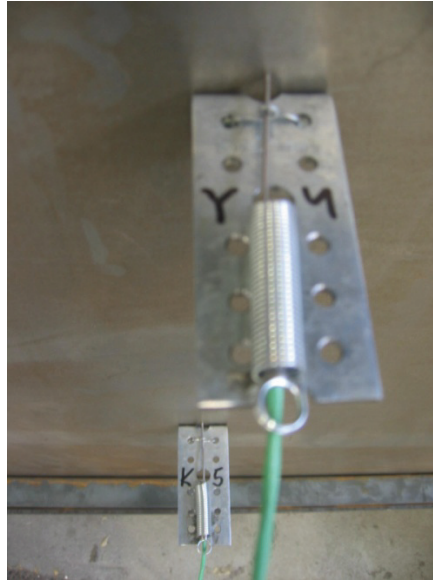
Termoelementtien käyttöä tukee myös niiden edullisuus, pieni koko sekä niiden kyky mitata yli 1000 °C lämpötiloja. Termoelementtien tarkkuus toisaalta ei ole yhtä hyvä kuin esimerkiksi vastusantureilla ja termoelementeillä tuleekin huomioda lähettimen liitinpäässä tapahtuva virhe sekä lineaarisoinnin tarkkuus. Termoelementtien liitinpäässä eli kylmässä päässä tapahtuu virhettä, koska mittalaitteisiin syötetty standarditaulukko lämpötilaeron ja jännitteen suhteesta on esitetty viitelämpötilassa 0 °C. Näin ollen kylmän pään ollessa muussa kuin lämpötilassa 0 °C, muodostuu mittarilukemaan pientä virhettä. Linearisoinnista aiheutuva virhe taas johtuu mittalaitteeseen syötetyn lämpötila-jännite-aulukon tarkkuudesta ja mittalaitteen erottelukyvyn tarkkuudesta jännite-eroa mitattaessa. [7]

K-tyypin termoelementtien kohdalla puhutaan alle 300 °C lämpötilamittauksissa muutaman asteen suuruisesta mittausrvirheestä, kun taas 1000 °C tietämällä lämpötilapoikkeamalla voi olla jopa 10 K:n vaihteluväli. Tarkempia mittausrvoja kyettäisiin saamaan esimerkiksi vastusantureilla, joiden toiminta perustuu metallin resistanssin ja lämpötilan riippuvuuteen. Vastusantureissa käytettävien metallien resistanssi muuttuu hyvin lineaarisesti tietyllä lämpötila-alueella, jolloin vastusantureissa ei lineaarisoinnista käytännössä muodostu virhettä, toisin kuin termoelementeillä hieman tapahtuu. Lisäksi kun käytetään vastusanturia, jossa on 3- tai 4-johdinkytkentä, pystytään kompensoimaan vastusanturin kylmässä päässä tapahtuva ympäristön lämpötilasta johtuva virheen muodostus, jolloin saadaan entistä tarkempia mittaustuloksia. Toisaalta vastusantureiden käyttölämpötilat ovat hyvin rajalliset ja yleisesti käytössä olevalla Pt-100 -anturillakin voidaan tarkasti mitata maksimissaan vain noin 400 °C lämpötiloja. Kyseisen anturin mahdollinen mittausaluekin rajoittuu jo lämpötilaan 850 °C, joten polttouunin sisälämpötilan mittauksessa ei edes voitaisi hyödyntää tällaisia antureita. [7]

Antureiden hankinnan osalta päädyttiin edellä ilmenneiden asioiden pohjalta termoelementtiantureihin, vaikka niiden mittaustarkkuus ei olekaan optimaalinen. Termoelementtianturit ovat kuitenkin tarkkuudeltaan riittävää tasoa polttostandardeissa annettujen rajojen suhteen ja useassa virallisiin testauksiin rakennetuissa standardikoisissa polttouuneissa käytetään juuri K-tyyppin termoelementtiantureita lämpötilojen mittaukseen. Polttouunin sisälämpötilan mittauksessa joudutaan joka tapauksessa käyttämään termoelementtiä sen korkean lämpötilankeston vuoksi. Testikappaleiden pintalämpötilojen mittauksessa olisi voitu hyödyntää tarkkoja Pt-100 -antureita, mutta testikappaleiden pintalämpötilan rajoituttua alle 300 °C todettiin, että termoelementtien noin asteen suuruinen toleranssi mittauservoissa ei ole merkityksellinen tulosten perusteella tehtävissä analyysissä. Lisäksi vastusantureita käytettäessä olisi jouduttu hankkimaan toinen mittalaitteisto tietojen tallennukseen nykyisen dataloggerin rinnalle. Termoelementtiantureita hankittaessa tuli ainoastaan varmistaa, että niiden mukana tulee nykyiseen dataloggerin kanaviin sopivat K-tyyppin miniliittimet.

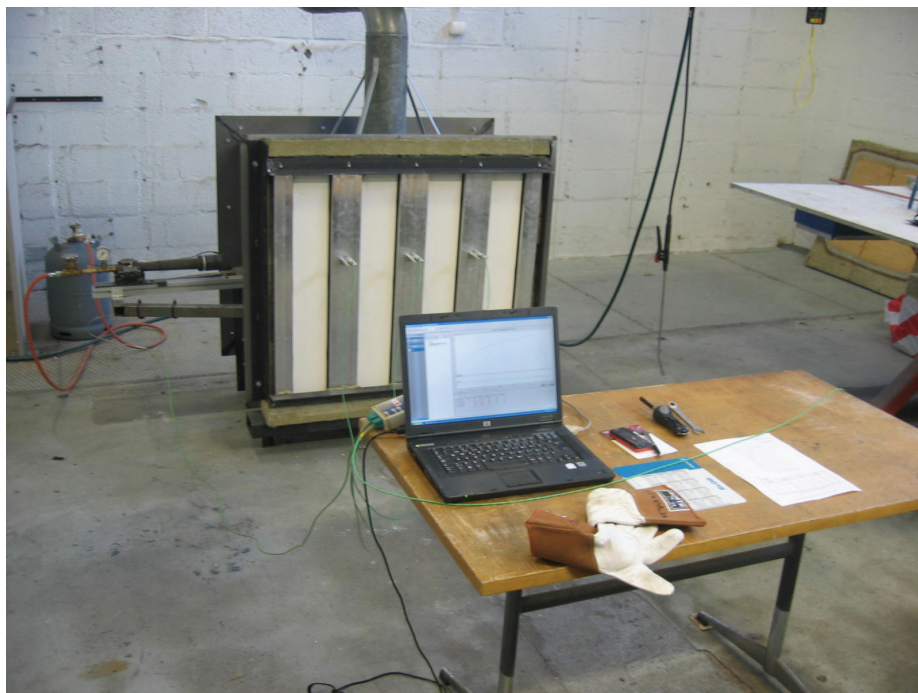
Uunin sisälämpötilaa mittaavaksi anturiksi hankittiin 6 mm halkaisijaltaan oleva puikkoanturi, joka on 500 mm pituudeltaan. Anturin varsinainen mittaava elin löytyy vain noin millimetrin pituudelta puikon päästä ja loppuosa puikosta on ainoastaan suojakuorta. Anturi kiinnitetään aukaistavilla pidikkeillä uunin runkoon. Anturia varten tehdään myös uunin runkoon reikä, josta anturi pujotetaan uunin sisälle. Reikä täytyy tehdä paikkaan, jossa anturi ei pääse missään testauksen vaiheessa suoraan kosketukseen polttimeen liekkiin eikä myöskään testikappaleista putoaviin tai sulaviin materiaaleihin. Lisäksi anturin sijainti tulisi olla sellainen, että se mittaisi mahdollisimman hyvin juuri testikappaleisiin vaikuttavan lämpötilan suuruutta. Näin ollen uunin sisälämpötilaa mittaava anturi sijoitettiin samalle seinämälle kuin missä poltin on, mutta sivusuunnassa hieman lähemmäksi testikappaleita sekä korkeussuunnassa katsottuna uunin alaosaan. Kyseisessä sijainnissa anturi on turvassa testikappaleista uunin pohjalle irtoavista ja sulavista materiaaleista. Anturin sijainti on lisäksi sellainen, että se mittaa oletettua uunin alinta lämpötilaa, jolloin jokaisen testikappaleen olosuhteet ovat vähintään standardin vaatimusten mukaiset.

Testikappaleiden pintalämpötilan mittaukseen käytetään vastaavanlaisia puikkoantureita kuin uunin sisälämpötilan mittaukseen, mutta kooltaan anturit ovat pienempiä eli Ø1.5x50 mm kokoisia. Pintalämpötila testikappaleista mitataan sekä pysty- että vaakasuunnassa katsottuna keskeltä. Kiinnitystä varten tehtiin antureille yksinkertaiset pidikkeet (kuva 3.8), jotka ruuvataan tukevasti profiilien pintaan pienillä ruuveilla. Anturien pidikkeisiin suunniteltiin lisäksi yksinkertainen jousirakenne, joka varmistaa anturin mittaoselimen pysyvyyden testikappaleen pinnassa koko testin ajan. Pintalämpötilan mittaukseen olisi voitu käyttää myös virallisia pintalämpötila-antureita, mutta niiden teippi/ liimapintakiinnitystä ei pidetty riittävän hyvänä. Ongelmaksi edellä mainitulla kiinnitystavalla muodostuu liiman pysyvyys profiilin pinnassa koko testijakson ajan varsinkin, kun anturia joudutaan kiinnittämään toistuvasti uusien testattavien kappaleiden pintaan.



Kuva 3.8. Testikappaleiden pintalämpötilan mittauksessa käytettävät anturit sekä niiden kiinnityspidikkeet.

Uunin polttimen suuresta tehokkuudesta ja toisaalta uunin pienestä koosta johtuen testikappaleita ei saada asetettua siten, että kaikkiin vaikuttaisi testauksessa sama lämpötila yhtä aikaa. Kauimmaksi polttimesta sijoitettu testikappale saa osakseen suuremman lämpötehon kuin lähimpänä poltinta oleva testikappale johtuen kuuman ilman kierrosta uunin sisällä. Tästä syystä on ehdottoman tärkeää suorittaa polttouunin esitestauksen aikana myös testikappaleiden lämpötilaskaalaus, jotta tiedetään testikappaleiden lämpötilan todellinen vertailuarvo, joka on riippuvainen testikappaleen sijainnista polton aikana. Skaalaus suoritetaan tekemällä polttotestaus kolmella toisiaan vastaavalla testikappaleella, jolloin ainoa muuttuja testikappaleiden välillä on uunin sisälämpötilan ero. Kuvassa 3.9 on havainnollistettu testikappaleiden sijoittelua sekä näytetty muu testauksessa käytetty testaus- ja mittalaitteisto.



Kuva 3.9. Testikappaleiden sijoittelu sekä testaukseen käytetty mittauslaitteisto.

4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä luvussa esitellään työn eri vaiheista saatuja tuloksia. Vaikka luvun sisältö on yritetty esittää selkeästi etenevänä päättelyketjuna, jouduttiin varsinaisessa työssä limittämään eri vaiheita työhön kuluvan ajan lyhentämiseksi. Oli äärimmäisen tärkeää saada nopeasti tilaukseen sellaiset testilaitteiston osat ja testattavat materiaalit, joilla oli oletettavissa pitkät toimitusajat. Ennen kuin testauksessa käytettyä polttouunia oli päästy edes virallisesti ottamaan käyttöön, oli suurin osa sillä tehtävistä testeistä jo suunniteltuna valmiiksi sekä materiaalit kyseisiin testeihin tilattuina ja osin jopa esivalmisteltuina.

Jotta edellä mainittu eri vaiheiden limitys oli ylipäänsä mahdollista, tuli työn alkuvaiheessa tutustua huolella koko laajaan polttotestauksen aihepiiriin sekä siihen liittyvään materiaaliin, määräyksiin ja standardeihin. Lisäksi työn onnistumisen kannalta oli erityisen tärkeää luoda selkeä tavoite työlle ja työn rakenne pääpiirteissään ennen varsinaiseen työhön ryhtymistä.

4.1 Tiedonhaun tulokset

Palonsuojausmenetelmiä kartoittaessa päähuomio keskitettiin profiilien sisään sijoitettaviin täyteaineisiin, sillä niillä katsottiin olevan suurin merkitys elementin pintalämpötilojen alentamisessa eli rakenteen lämmöneristävyydessä. Täyteaineiden kohdalla katsottiin eduksi, jos täyteaineen koneistus ja etenkin tarkka sahaus profiilien sisään sopiviksi soiroiksi olisi helppoa. Täyteaineiden lisäksi haettiin myös muita erilaisia palonsuojausmenetelmien vaihtoehtoja, joilla pystyttäisiin tukemaan täyteaineiden toimintaa ja parantamaan testien tuloksia.

Löydetty täyteaineet jakautuivat kolmeen toisistaan erottuvaan rakennuslevyjen kategoriaan. Selvästi eniten vaihtoehtoja täyteaineeksi löytyi kipsilevyjen joukosta, joka on hyvin yleinen rakennusmateriaali. Myös erilaisia kalsiumsilikaattilevyjä, joita käytetään erityisesti kantavien teräsrakenteiden palonsuojauksessa, löytyi kaupallisesta muodosta kohtuullisesti. Selvästi vähiten tarjontaa oli kolmannessa kategoriassa, jonka rakennuslevyt pohjautuivat natriumsilikaatin käyttöön.

Kipsilevyjen selvänä etuna on niiden suuri valikoima, hyvä saatavuus ja alhainen hinta muihin palonsuojaukseen tarkoitettuihin rakennuslevyihin verrattuna. Myös kipsilevyjen pienimuotoinen työstö ja muokkaus onnistuvat varsin yksinkertaisilla käsityökaluilla, kuten esimerkiksi mattoveitsellä ja porakoneella. Varsinainen kipsilevyjen sahaus ja muotoilu on hyvä kuitenkin toteuttaa tehokkaiden imurien, riittävän tuuletuksen ja hyvien suojavälineiden kanssa, sillä sahatessa kipsilevyistä irtoaa hyvin hienojakoista ja helposti pölyävää tomua, joka voi olla terveydelle haitallista. Kipsilevyjen sa-

hauksessa riittää tavallinen sirkkelinterä, mutta kovapalaterän käyttöä suositellaan terän ennen aikaisen kulumisen estämiseksi.

Kipsilevyjä valmistetaan moneen eri käyttötarkoitukseen soveltuvana, kuten esimerkiksi rakennuksen väliseinien, lattioiden ja kattojen tekoon, mutta myös esimerkiksi teräsrakenteiden palonsuojaustarkoitukseen. Perusmassa kaikissa kipsilevyissä on sama, joka koostuu kalsiumsulfaatista muodostuvista kipsikiteistä. Kipsikiteisiin on kemiallisen sidoksen avulla sitoutunut kidevettä, joka kattaa noin 20 % koko kipsilevyn ominaispainosta. Kipsilevyjen tehokkuus palonsuojauksessa perustuukin tämän kideveden vapautumiseen lämmön vaikutuksesta. Kipsilevyä lämmitettäessä tapahtuu kideveden kemiallisten sidosten rikkoutumista, kalsinointia, jolloin kidevesi vapautuu kalsiumsulfaatista vetenä ja vesihöyrynä ja kalsiumsulfaatti muuttuu jauhemaiseksi. Kyseinen prosessi sitoo jo itsessään huomattavan määrän energiaa, jonka suuruutta vapautuneen kideveden höyrystyminen faasimuunnoksessa vain entisestään kasvattaa. Näin ollen polttotesteissä pystytään kipsistä irtoavan kideveden avulla jäähdyttämään profiileita niin kauan kuin kidevettä kipseissä riittää.

Kalsiumsulfaatin kiderakenne ei ole erityisen kestävä, vaan kipsilevyt murtuvat hauraasti jo suhteellisen pienen taivutuskuorman vaikutuksesta. Kipsilevyt ovat varsin herkkiä myös ylimääräiselle kosteudelle, jonka vaikutuksesta kipsilevyt pehmenevät ja menettävät levymäisyytensä. Kipsilevyjen jäykkyyttä ja kosteudenkestoa voidaan parantaa erilaisilla kuitu- ja täyteaineilla, kuten esimerkiksi lasikuiduilla ja kivipohjaisilla aineilla. Kipsilevyt ovat normaalisti myös päällystetty kartongilla, jolla parannetaan omalta osaltaan kipsilevyjen jäykkyyttä ja kosteudenkestoa sekä levyjen käsiteltävyyttä.

Toinen kohtuullisen paljon palonsuojauksessa käytetty rakennuslevymateriaali on kalsiumsilikaatti. Kalsiumsilikaatti on kuituvahvistettuna jäykempi ja lujempi rakennuslevy kuin kipsilevyt, eivätkä kalsiumsilikaattilevyt murru yhtä helposti kuin kipsilevyt niitä taivutettaessa. Lisäksi ne sietävät korkeita lämpötiloja ominaisuutensa säilyttäen, joten kalsiumsilikaatti soveltuu palonsuojaukseen hyvin. Toisaalta kalsiumsilikaatti ei itsessään sisällä kovinkaan paljoa kosteutta tai materiaaliin sitoutunutta kidevettä, jota on vain noin 5 % levyn ominaispainosta. Kalsiumsilikaattilevyjen perusmassaan on voitu lisätä kipsiä ja muita täyteaineita, joilla levyjen kosteusprosenttia on voitu hieman kasvattaa ja näin ollen parantaa levyjen jäähdyttävää ominaisuutta polttotestauksessa.

Vastapainoksi kalsiumsilikaattilevyt sietävät ulkoista kosteutta huomattavasti paremmin kuin kipsilevyt, eivätkä ne ime kosteutta itseensä kovinkaan paljoa, joten niitä voidaan hyödyntää myös kosteahkoissa ympäristöissä. Edellä mainittujen täyteaineiden lisäksi kalsiumsilikaattilevyt voivat sisältää esimerkiksi hiekkaa tai perliittiä, joiden avulla voidaan parantaa kalsiumsilikaattilevyjen kovuutta, kosteudenkestoa ja keveyttä. Kalsiumsilikaattilevyjä käytetäänkin kipsilevyjen tapaan moneen muuhun tarkoitukseen rakentamisessa kuin pelkästään palonsuojaukseen, kuten esimerkiksi märkätiloissa ja iskunkestävyyttä vaativissa seinärakenteissa. Tästä syystä myös eri kalsiumsilikaattilevyjen tarjonta on markkinoilla varsin kattavaa, eikä kalsiumsilikaattilevyjen markkinahinnatkaan ole paljoa kipsilevyjä korkeampia.

Kalsiumsilikaatti on perusmassaltaan hieman kovempaa ainetta kuin kipsilevyt, mutta kalsiumsilikaattilevyjen työstö onnistuu lähes yhtä hyvin ja helposti kuin kipsilevyjen tapauksessa. Kalsiumsilikaattilevyjen sahaus on hyvä kuitenkin suorittaa vähintään kovapalateriä käyttämällä tai jopa timanttipinnoitetuilla työkaluilla niiden kovuudesta johtuen. Kalsiumsilikaattilevyt eivät pölyä niitä sahatessa aivan yhtä paljon kuin kipsilevyt, mutta sahauspölyn kohdepoistosta on hyvä huolehtia imuroinnin ja tuuletuksen avulla. Kalsiumsilikaattilevyille ei kiinnitystä varten tarvitse välttämättä tehdä alku-reikiä levyn pintaan, kuten kipsilevyillä suositellaan levyn reunahalkeamisen estämiseksi.

Vähiten tarjontaa täyteainevaihtoehtoista löytyi natriumsilikaattia sisältävien rakennuslevyjen kohdalla. Natriumsilikaattilevyt ovat pääasiallisesti tarkoitettu vain pelkästään palonsuojaukseen, eikä niitä käytetä juurikaan muussa rakentamisen osaluueessa. Tästä syystä natriumsilikaattilevyt ovat selvästi kalliimpia hinnaltaan verrattuna kipsi- ja kalsiumsilikaattilevyihin. Hintaan vaikuttaa suuresti myös natriumsilikaatin työläs valmistusprosessi sekä monimutkaisemmat varastointi- ja työstömenetelmät. Natriumsilikaatti muodostuu piin ja hapen sekä natriumin kemiallisena yhdisteenä, jonka liuos tunnetaan myös nimellä vesilasi. Nimitys juontuu siitä, että natriumsilikaatti liuos on hyvin kirkas, läpinäkyvä ja lasimainen, mutta geelimäinen neste. Geelimäinen liuos kuivuu ja kovettuu ajan myötä kiinteäksi aineeksi. Kiinteässä muodossa natriumsilikaatti on kovaa ja haurasta, mutta lisäämällä perusmassaan eri täyteaineita ja kuituja, saadaan natriumsilikaatista valmistettua hieman paremmin taivutusta kestävä ohutta levyä.

Ominaisuuksiltaan natriumsilikaattilevyt ovat kuitenkin palonsuojauksessa ylivertaisia kipsi- ja kalsiumsilikaattilevyihin verrattuna. Natriumsilikaatin teho perustuu sen hydraattimuotoon, jossa natriumsilikaattiin on sitoutettu huomattavia määriä vettä. Natriumsilikaattilevyjen kosteuspitoisuus liikkuu välillä 20–40 % levyn ominaispainosta, joka pystytään vapauttamaan materiaalista lämmön avulla vastaavalla tavalla kuin kipsilevyjen kideveden tapauksessa. Natriumsilikaatti myös turpoaa huomattavasti lämmön vaikutuksesta muodostaen tiiviin, kovan ja vaahtomaisen hiiltymän, joka toimii hyvänä lämpöä eristävänä kerroksena. Parhaimmillaan natriumsilikaattilevyille luvataan jopa yli 20-kertainen turpoamissuuruus alkuperäiseen nähden, kun turpoaminen tapahtuu vapaasti. Natriumsilikaattilevyillä tuleekin turpoamisesta aiheutuva turpoamisvoima ottaa huomioon, joka voi aiheuttaa useamman baarin paineen vaikutuspinta-alansa.

Natriumsilikaattilevyistä löytyy muutamaa erityyppistä levyä, joissa natriumsilikaattia on hyödynnetty hieman toisistaan poikkeavilla tavoilla. Toisessa tyyppissä natriumsilikaattigeelin sekaan on laitettu pelkästään kuitumattoa vahvikkeeksi, jonka jälkeen geeli on kuivatettu ohueksi muutaman millimetrin paksuiseksi levyksi. Toisen tyyppisessä ratkaisussa kuidunpätkillä vahvistettua natriumsilikaattigeeliä on hyödynnetty kovien ja jäykkien palonsuojakuitulevyjen laminoinnissa ja liimauksessa toisiinsa sandwich-rakenteeksi, jolloin varsinaisia natriumsilikaattikerroksia on useita, mutta hyvin ohuina kerroksina.

Natriumsilikaatti on veteen herkästi liukenevaa, joten natriumsilikaattilevyt tulevat käyttökohteessa suojata kosketukselta nesteisiin sekä kostealta ympäristöltä. Toi-

saalta natriumsilikaatti reagoi helposti myös lämpötilan nousuun, joten natriumsilikaattilevyjä työstettäessä tulee huolehtia, ettei kitkan tai muun tapahtuman johdosta lämpötila pääse työstettäessä nousemaan. Natriumsilikaattilevyjen sahaukseen suositellaan käytettäväksi timanttipinnoitettuja teriä materiaalin kovuudesta johtuen, mutta pienten sahausmäärien tapauksessa voidaan harkita lisäksi kovapalaterän käyttöä, kunhan huolehditaan terän kunnosta riittävän tihein väliajoin. Natriumsilikaattilevyjen katkaisu mattoveitsellä tehdyn viillon ja taivutuksen avulla tuottaa varsin karkean murtumisjäljen, eikä kyseistä tapaa suositella natriumsilikaattilevyjen katkaisussa.

Natriumsilikaattipohjaisia tuotteita on tarjolla palonsuojalevyjen ohella myös turpoavana tiivistenauhana. Kyseiseen tarkoitukseen natriumsilikaatti sopii mainiosti, sillä runsaan turpoavuuden lisäksi natriumsilikaatista irtoava neste sitoo lämpöä höyrystyessään ja jäähdyttää näin ollen tiivisteiden kohtaa hetken aikaa. Tällaista ominaisuutta ei useimmissa muissa turpoavissa tiivisteissä ole. Lisäksi tiivisteestä turvonnut vaahto on suhteellisen kestävä, eikä esimerkiksi paine-eroista johtuvat ilmavirrat pysty muokkaamaan muodostuneen vaahdon muotoa. Natriumsilikaattipohjaisten tiivistenauhojen huonona puolena on niiden kallis hinta sekä rajusta turpoamisesta aiheutuvat voimat, jotka pystyvät pahimmassa tapauksessa rikkomaan rakennetta epätoivotulla tavalla.

Perinteisemmät turpoavat tiivisteet ovat tehty esimerkiksi puristamalla kuohkeita kivivillakuituja ohueksi nauhaksi. Kyseinen tiivistenauha pitää ohuen muotonsa materiaaliin lisättyjen sideaineiden voimin, jotka lämmön vaikutuksesta pettävät ja tiivistenauha turpoaa takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Puristettujen villatiivisteiden etuna on, että niiden turpoamissuuntaan voidaan vaikuttaa kuitukerrosten asettelulla ja ladonnalla sekä lisäksi turpoavien villatiivisteiden hinta on kohtuullinen muihin turpoaviin tiivisteisiin nähden. Niiden haittapuolena taas on se, että turvonneessa muodossaan lyhyet villakuidut ovat kovin hatarasti kiinni toisissaan ja tästä syystä reipas ilmavirta voi puhaltaa tiivisteiden tukkiman raon tai aukon taas avonaiseksi.

Tiedonhaun yhteydessä selvisi myös natriumsilikaattiliuoksen eli vesilasin valmistusmenetelmä, joka on varsin yksinkertaista toteuttaa niin sanotuin kotikonstein. Vesilasin muodostamiseksi tarvitaan kvartsia eli piidioksidia sekä väkevää natriumhydroksidiliuosta eli lipeää. Kvartsin ja lipeän annetaan reagoida keskenään ja tapahtumaa voidaan nopeuttaa lämmön avulla, joka toimii katalyyttinä kemialliselle reaktiolle. Syntyntä geelimäistä liuosta voidaan käyttää osien päällystämiseen tai liimaukseen, jolloin osiin saadaan lisättyä väritön ja kuivuttuaan kiinteä sekä palolta hyvin suojaava kerros. Esimerkiksi lasikuitua sekoittamalla geelin joukkoon, voidaan vesilasiliuoksesta valmistaa jäykkiä levyrakenteita.

Edellä mainitun tapaisia vesilasiin pohjautuvia liimoja löytyy myös valmiina kaupallisina versioina, joiden avulla voidaan kiinnittää ja kitata erilaisia rakennus- ja palonsuojalevyjä. Varsinkin kosteuden suhteen imukykyisten rakennuslevyjen, kuten esimerkiksi kipsilevyjen, liimaus ja kittaus voidaan toteuttaa vesilasiin pohjautuvalla liimalla. Myös metallisia paneeleita ja levyjä, jotka eivät ime kosteutta ollenkaan sisäänsä, voidaan liimata tällaisilla liimoilla. Tämän työn kohdalla liimoilla voitaisiin mahdollisesti kiinnittää profiilien täyteaineita kammioiden seinämiin ja näin saavuttaa

parempi palonsuojaus liimamateriaalista saatavan suojauksen avulla ja myös sitä kautta, että täyteaineet pysyisivät polttotestauksessa paremmin niille halutuilla paikoillaan.

Viimeisenä varteenotettavana palonsuojausmenetelmänä tiedonhaussa löydettiin palonsuojamaalit. Profiilien pintakäsittely on lähes välttämätöntä profiilien käyttöiän pidentämisen ja kulutuksen keston kannalta, joten profiilien käsittely palonsuojamaalilla ei varsinaisesti toisi ylimääräisiä työvaiheita profiilien valmistukseen nykyiseen työkiertoon verrattuna. Myös pinnanlaatu palonsuojamaalien valmistajien mukaan on yhtä tasainen ja laadukas kuin tavallisilla maaleilla. Toisaalta alumiiniprofiileita käytetään paljon myös anodisoituina versioina, joten näissä tapauksissa palonsuojamaalausta ei pintakäsittelynä voisi edes toteuttaa. Työn yhteydessä palonsuojamaaleja voitaisiin harkita kuitenkin kaikissa tapauksissa siihen tarkoitukseen, että niillä käsiteltäisiin profiilien sisään tulevat täyteaineet, jolloin täyteaineiden palonsuojauskyky mahdollisesti voimistuisi alkuperäisestä.

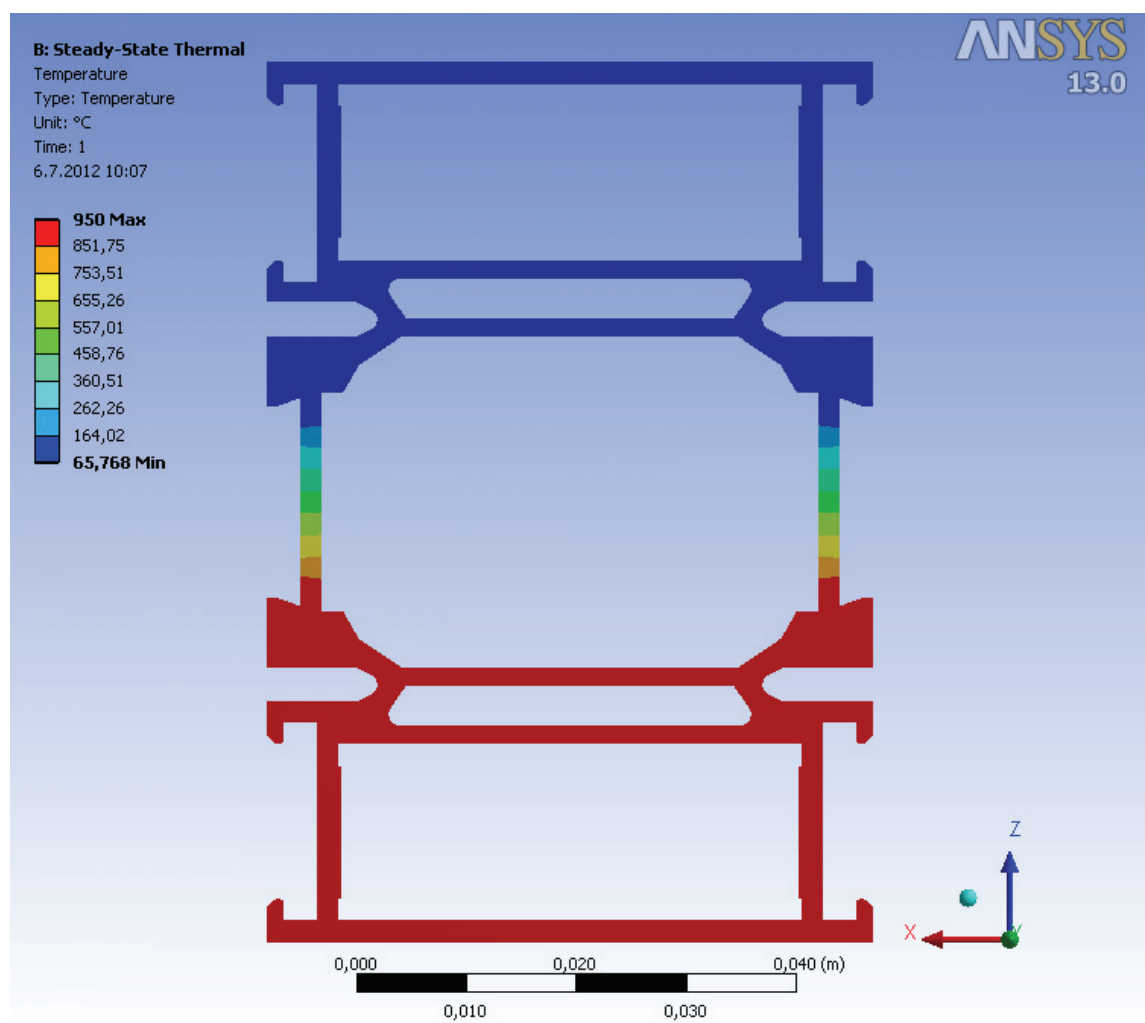
Palonsuojamaalien teho perustuu maalikerroksen paisuntaan lämmönvaikutuksesta, jolloin suojattuun kohteeseen muodostuu lämpöä eristävä vaahtomainen kerros. Paisunut maalikerros voi paksuudeltaan olla useita kymmeniä kertoja vahvempi kuin alkuperäinen maalikerros ja suojata allaan olevaa rakennetta huomattavan pitkään tavaliseen maaliin verrattuna. Palonsuojamaalien haittapuolena on niiden pinnan alhainen kulutuksen- sekä kosteudenkesto. Lisäksi tuotantokustannukset ovat tavalliseen maalaukseen verrattuna suuremmat, johtuen palonsuojamaalien hinnasta sekä palonsuojamaalien vaatimasta tarkasta laadunvalvonnasta, sillä palonsuojamaalien pintakerroksen paksuus tulee osua tarkkojen toleranssien sisään, jotta se takaisi halutun suojauskyvyn rakenteelle.

Tiedonhaussa kerättyjen tietojen perusteella voitiin luotettavin mielin lähteä työssä eteenpäin, sillä tiedonhaulla löytyi suuri määrä testaamisen arvoisia vaihtoehtoja työn alussa asetetun ongelman ratkaisemiseksi. Löydettyjä vaihtoehtoja lähdettiin testaamaan karkeasti siinä järjestyksessä, mitkä olisivat yksinkertaisimmin toteutettavissa ja jotka voisivat olla todennäköisimpiä ratkaisuja ongelmalle. Tarkoituksena oli löytää helpoin sekä kannattavin ratkaisu ongelmalle eri vaihtoehtojen joukosta ja suorittaa käytännöntestausta vain tarvittava määrä karsimalla epätodennäköiset ja vaikeasti toteutettavat ratkaisut pois.

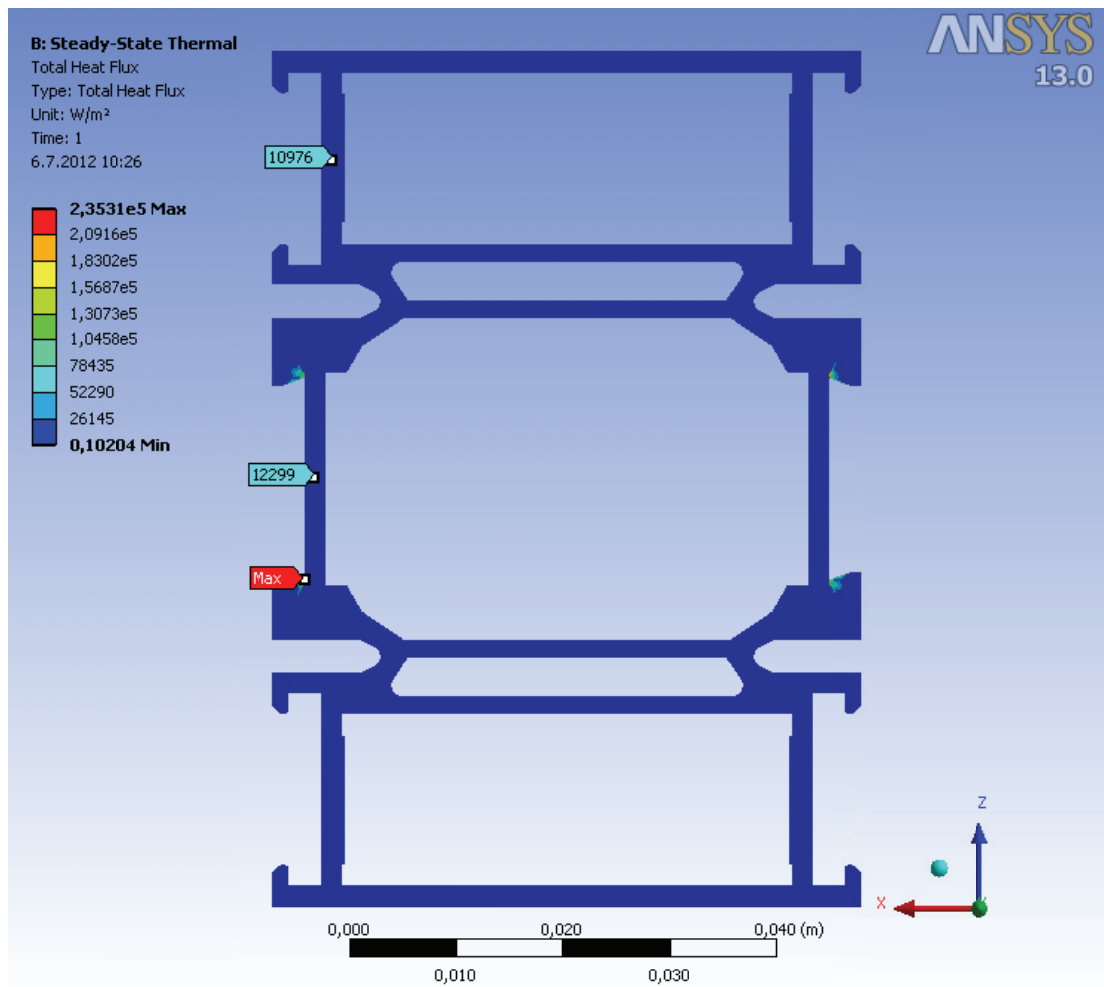
4.2 Laskennasta saadut tulokset

Rakenteille tehdyillä lämmönsiirtoanalyysillä, jotka suoritettiin mallinnuksen ja laskennan avulla, haluttiin saada lisäymmärrystä yksittäisten asioiden vaikutuksesta ja niiden merkittävyydestä palonsuojauksen kannalta. Laskennasta saatujen tuloksien avulla haluttiin pääasiassa tukea työssä tehtävien käytännönkokeiden analysointia sekä tuoda arvokasta pohjatietoutta tulevaisuudessa tehtäville samaiseen aihealueeseen liittyville tuotekehitysprojekteille. Näin ollen laskennan tuloksia ei voitu suoraan hyödyntää käytäntöön soveltuvina, vaan laskennasta saadut tiedot varmistettiin vielä erillisen polttotestauksen avulla.

Laskennasta saatavien tulosten vertailukohteeksi mallinnettiin ja laskettiin nykyisin käytössä olevan Purson P80-sarjan perusrunkoprofiilin lämmönsiirtyminen 1000 mm pitkälle salolle, jossa ei ollut yhtään lasinkiinnikettä asennettuna profiilin kylkiin sekä pinnaksi valittiin raaka ja kiillotettu alumiini. Tällä tavalla meneteltynä saatiin pelkän muovikatkoilla lämpöeristetyin profiilin kylmänpuolen pintalämpötila lasketuksi sekä profiilin läpi kulkevan lämpövirrantiheyden arvot selvitettyksi eri kohdissa. Kuvassa 4.1 nähdään profiilin poikkileikkauksesta lämpötilojen jakaantuminen profiilin poikkileikkauksessa. Kuvassa 4.2 on taas esitetty lämpövirrantiheyden suuruudet profiilin poikkileikkauksessa edellä mainitulle tapaukselle. Kuvaan 4.2 on lisäksi merkitty lämpövirrantiheyksien suuruudet erikseen vaaleansinisillä merkkilapuilla kahteen valittuun kohtaan, joita seurattiin myös muiden laskujen aikana.



Kuva 4.1. Perusprofiilin poikkileikkauksen lämpötilajakauma laskennassa.



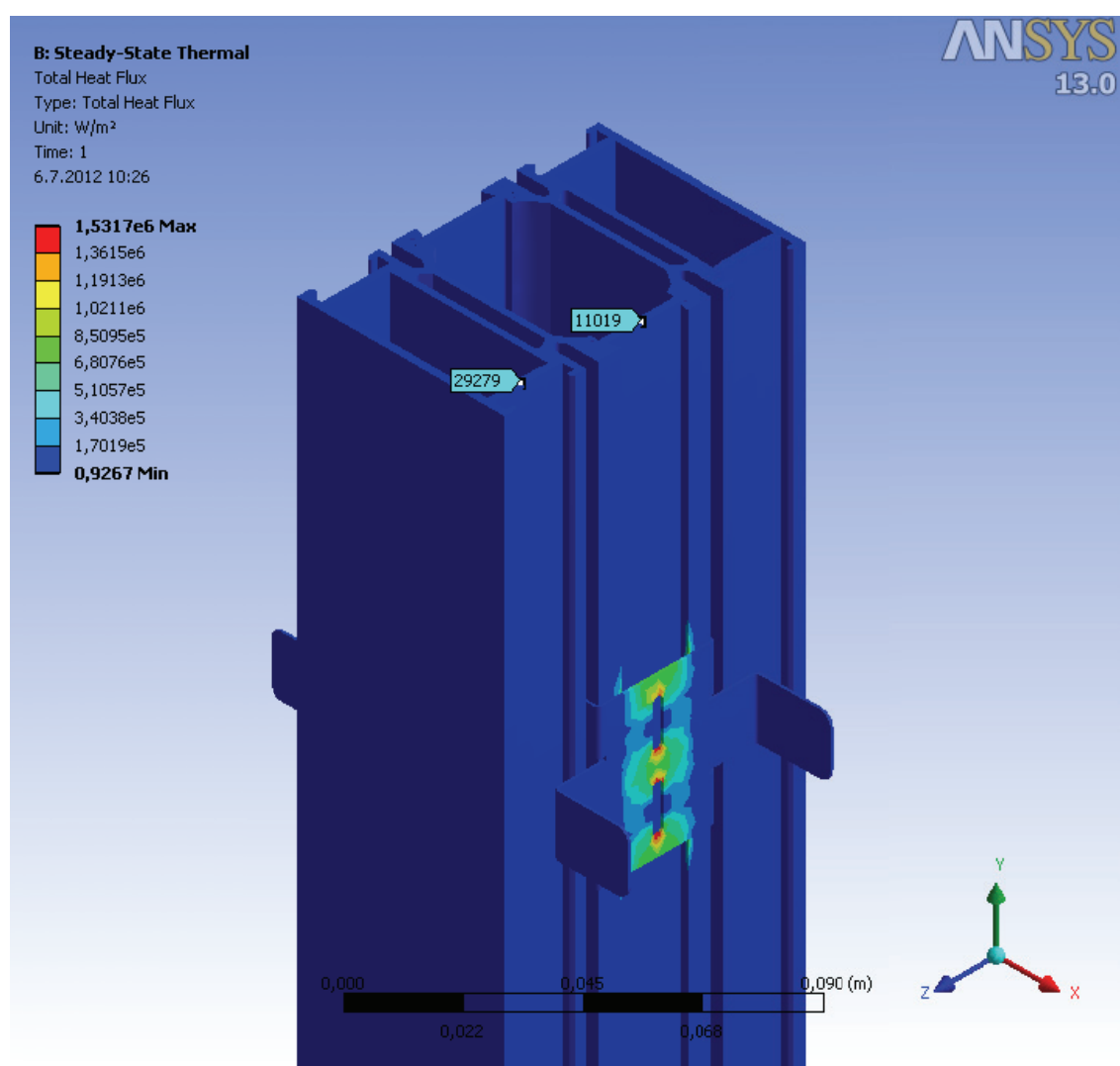
Kuva 4.2. Perusprofiilin poikkileikkauksen lämpövirrantiheys profiilin läpi. Lisäksi kuvasta näkyy merkittynä mittauskohdat, joita seurattiin eri lämmönsiirto tarkasteluiden välillä.

Lämmönsiirtolaskennat suoritettiin myös raakapintaiselle rei'itetylle profiilille, jossa ei ollut lasinkiinnikkeitä asennettuna sekä perusprofiilille, jonka pinta vastasi emissiivisyyden suhteen anodisoitua pintakäsittelyä. Näiden lisäksi laskut suoritettiin sellaisille profiileille, joihin oli kiinnitetty valmistusohjeiden mukaisella jaolla lasinkiinnikkeet molemmiin puoliin profiileita. Tällaisissa kokoonpanoissa käytettiin perusprofiilia sekä raakana että anodisoituna ja lisäksi myös raakaa rei'itettyä profiilia. Lasinkiinnikkeiden kohdalla seurattiin laskuissa niiden maksimilämpövirrantiheyttä. Kaikista laskuista saadut tulokset ovat kerätty taulukkoon 4.1. Kuvasta 4.3 nähdään lämpövirrantiheyden kehittyminen lasinkiinnikkeissä sekä kuvasta 4.4 rei'itetyn profiilin kavennuksissa.

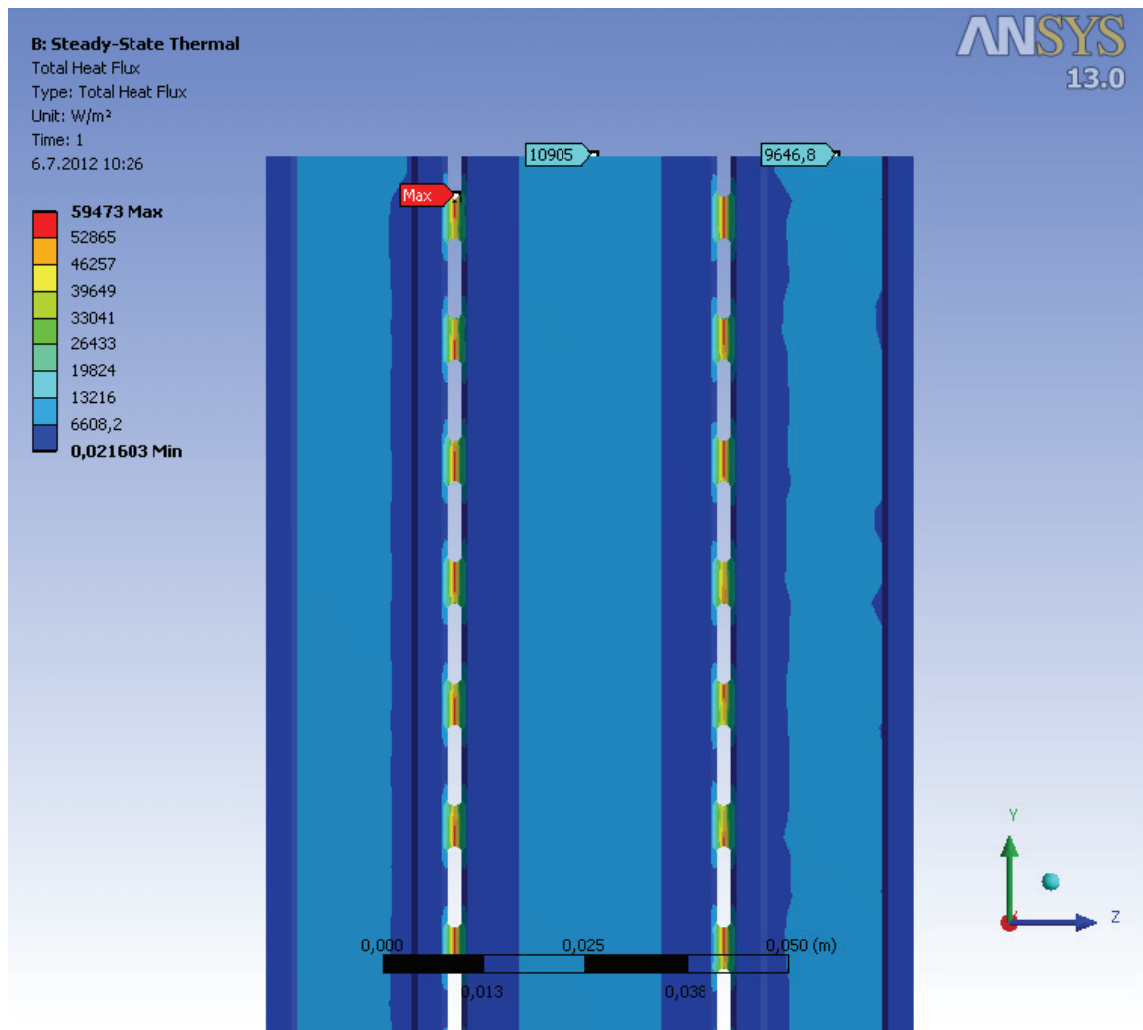
Laskennassa asetettiin uunipuoleisen profiilipuoliskon pintalämpötilaksi 950 astetta sekä ympäristön lämpötilana käytettiin arvoa 20 astetta. Taulukossa 4.1 esitetyissä tuloksissa ulkopinnan lämpötilat ovat kylmän puolen profiilipuoliskon pinnan keskustan minimilämpötiloja. Taulukon 4.1 lämpövirrantiheydet ovat otettu uunipuoleisen profiilipuoliskon syvyyssuuntaisen seinämän keskeltä sekä lämpökatkon keskeltä. Lämpövirrantiheyksien mittauskohdat ovat esitetty myös kuvissa 4.1, 4.3 ja 4.4 vaaleansinisten merkkilappujen avulla.

Taulukko 4.1. Lämmönsiirtolaskennasta saadut tulokset. Pintakäsittelynä profiileilla on joko raaka ja kiillotettu (emissiivisyys 0,03), anodisoitu (0,80) tai luonnollinen oksidikerros (0,30).

Profiili:	Pinta-käsittely:	Lasinkiinnikkeet:	Ulko-pinnan lämpötila (°C):	Lämpövirrantiheys profiiliseinämissä (W/m ²):	Lämpövirrantiheys lämpökatkoissa (W/m ²):	Lasinkiinnikkeiden max. lämpövirrantiheys (W/m ²):
Perus	Raaka	Ei	66	11000	12300	-
Perus	Anod.	Ei	57	11100	12300	-
Perus	Oksidi	Ei	62	11000	12300	-
Rei'itetty	Raaka	Ei	61	9650	10900	-
Perus	Raaka	Kyllä	167	29300	11000	1530000
Perus	Anod.	Kyllä	131	30400	11300	1600000
Rei'itetty	Raaka	Kyllä	163	28100	9920	1540000
Rei'itetty	Anod.	Kyllä	129	29100	10400	1610000



Kuva 4.3. Perusprofiiliin kiinnitettyjen lasinkiinnikkeiden läpi kulkevat lämpövirrantiheydet.



Kuva 4.4. Rei'itetyn profiilin sivukuva, jossa näkyvät rei'itetyn alueen lämpövirrantiheydet.

Laskennasta saaduista tuloksista selkeästi nähdään, että lasinkinnikkeillä on todella suuri merkitys profiilin läpi kulkeutuvan lämpövirrantiheyden suhteen. Lasinkinnikkeet muodostavat huomattavan lämpösillan profiilin eri puoliskojen välille ja suurin osa profiilin läpi kulkeutuvasta lämpövirrantiheydestä kulkeutuu juuri lasinkinnikkeitä pitkin. Näin ollen laskennan perusteella lasinkinnikkeiden määrään ja materiaaliin tulisi kiinnittää erityistä huomiota, jotta niiden kautta kulkeutuvan lämpötehon suuruutta voitaisiin pienentää. Lasinkinnikkeiden määrän vähentämisessä sekä materiaalin valinnassa tulee kuitenkin muistaa, että rakenteen eristävyys parantuessa, sen tiiviys voi vaarantua, jos lasinkinnikkeet eivät enää pystykään pitämään painavia palolaseja riittävän hyvin paikallaan.

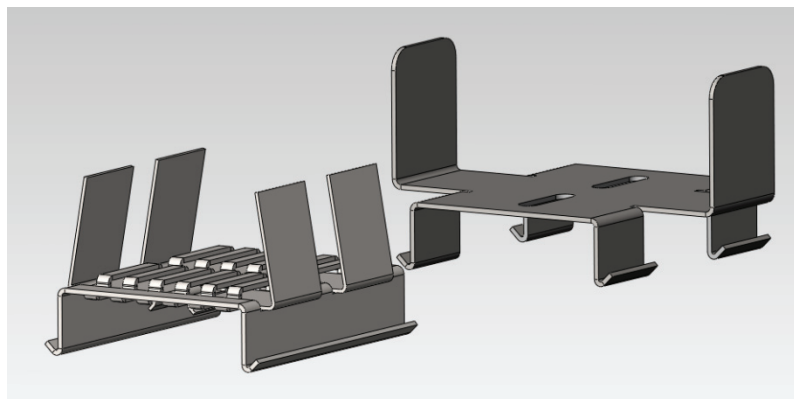
Kylmän puolen pinnan emissiivisyydellä on selvä merkitys pintalämpötiloihin. Anodisoidun profiilin suurempi lämpövirrantiheys selittyy pinnan profiilin säteilyn avulla luovuttaman lämpötehon kasvamisella pinnan emissiivisyyden suuruuden kautta, kuten aikaisemmin luvun 2.6 yhteydessä todettiin.

Vaikka raa'an alumiinin pintaan alkaakin ajan myötä muodostua luonnollista oksidikerrosta sen ollessa kosketuksissa ilman kanssa, ei luonnollisen oksidikerroksen emissiivisyys ole läheskään yhtä suuri kuin anodisoidun pinnan. Näin ollen anodisoitu

pinta säteilee lämpöä huomattavasti enemmän ja pysyy näin ollen viileämpänä muihin pintoihin verrattuna. Anodisoinnilla pystytään siis teoriassa alentamaan rakenteen ulkopinnan lämpötiloja ja näin ollen myös parantamaan rakenteen eristävyttä. Käytännön testit ovat kuitenkin ehdottoman tärkeässä asemassa tässäkin suhteessa, kuten käytännön testeistä saatujen tulosten käsittelyn yhteydessä tullaan huomaamaan.

Profiilien rei'ittämisellä ei lämmönsiirtolaskuissa saada kuin pieni ero perusprofiilin lämpötiloihin verrattuna. Rei'itettyjen profiilien pintalämpötilat laskevat vain nimellisesti, sillä lämpövirrantiheyden lasku on rei'itetyn profiilin kohdalla vain vähäistä perusprofiiliin verrattuna. Varsinkin lasinkiinnikkeiden yhteydessä ero on vain nimellinen, eikä näin ollen voida olettaa, että profiilien rei'ityksellä olisi kovinkaan suurta merkitystä polttotestauksen tuloksiin. Tämä päätelmä on sovussa myös aikaisempien tuotekehitysprojektien yhteydessä tehtyjen polttotestien tulosten kanssa, jotka osoittivat, että rei'itetyillä profiileilla ei saatu rakenteen eristävyttä parannettua pintalämpötilojen valossa. Rei'itettyjen profiilien käyttöä vastustaa myös ne tosiasiat, että profiilien rei'itys vaatii oman ylimääräisen työvaiheensa pursotuksen jälkeen sekä lisäksi rei'itetyn profiilin taivutusjäykkyys on pienempi perusprofiiliin verrattuna. Taivutusjäykkyyden aleneminen todettiin profiileille tehdyn yksinkertaisen nurjahdustarkastelun avulla.

Työn alussa asetettiin tavoite, että lasinkiinnikkeistä pyritäisiin tekemään säädettäviä, jotta kaikille lasinpaksuuksille voitaisiin käyttää yhtä ja samaa lasinkiinnikettä. Säädettävästä lasinkiinnikkeestä tehtiin muutamia erilaisia prototyyppejä, joista yksi on esitetty kuvassa 4.5 yhdessä perinteisen lasinkiinnikkeen kanssa. Säädettävän lasinkiinnikkeen ongelmaksi kuitenkin osoittautui sen lähes välttämätön runko-osuuden paksuuden lisääntyminen. Lasinkiinnikkeen rungon paksuuden lisääntyessä tarkoittaa se kokonaisessa elementissä palolasien leveyden ja korkeuden pienentymistä verrattuna perinteiseen lasinkiinnikkeeseen. Palolasien koon pienentyminen suhteessa sen karmeihin huonontaa rakenteen kestävyttä, sillä jäykät palolasit tukevat osittain rakennetta polttotestissä. Lisäksi palolasien sisältämä silikaattipohjainen geeli auttaa jäähdyttämään ja tiivistämään lasien reuna-alueita ja niiden profiileita. Näihin syihin perustuen lasien kokoa ei haluttu lähteä pienentämään ja näin ollen jouduttiin luopumaan myös säädettävien lasinkiinnikkeiden käyttämisestä.



Kuva 4.5. Edessä säädettävän lasinkiinnikkeen prototyyppi ja taustalla perinteinen lasinkiinnike.

4.3 Elementtien testauksesta saadut tulokset

Käytännön testauksesta saatu informaatiomäärä on valtava, eikä tässä luvussa ole tarkoitus käydä kaikkia testejä yksityiskohtaisesti läpi. Sen sijaan tähän lukuun on kasattu testien avulla saadut tärkeimmät huomiot alumiinisen rakenteen ja profiilien sisään sijoitettujen täyte- ja tiivistemateriaalien käyttäytymisestä. Lisäksi luvun aikana tarkastellaan testituloksia myös kokoonpantavuuden ja kaupallisuuden näkökulmista, joilla on suuri merkitys lopullista ongelmanratkaisua valittaessa.

Polttotestauksesta saatuja pintalämpötilakäyriä on esitetty liitteen 1 kuvaajassa, johon on kerätty osa mielenkiintoisimmista testituloksista. Tulosten määrästä johtuen myös kuvaajasta on jouduttu karsimaan osa tiedosta pois, mutta kaikista olennaisimmat huomiot pystytään tekemään kuvaajaan valittujen käyrien perusteella. Kuvaajan käyrien nopealla analysoinnilla havaitaan, että eri täyteaineet toimivat hyvin samanlaisesti toisiinsa nähden, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Toisaalta käyristä havaitaan, että eri täyteaineiden välillä muodostuu testin edetessä huomattavia eroja testikappaleiden pintalämpötilojen välille, joten täyteaineiden palonsuojaustehossa on huomattavissa selkeitä eroja.

Polttotestauksen edetessä on havaittavissa tiettyjä selkeitä ominaispiirteitä, joita alumiiniselle järjestelmälle tapahtuu polton aikana karkeasti arvioidulla ajanhetkellä. Piirteiden tarkkaan esiintymishetkeen vaikuttaa suuresti käytettyjen palonsuojausmenetelmien tehokkuus ja toisaalta eri palonsuojausmenetelmien polttotestin aikainen käyttäytyminen, jossa on myös jonkin verran eroavaisuuksia. Kuvasarjaan 4.6–4.10 on kerätty uunin sisältä polttotestin kuluessa otettuja kuvia, joista nämä ominaispiirteet voidaan helposti havaita. Polttotesteissä käytetyt elementit ovat syvyys suunnassa täysin symmetrisiä rakenteeltaan, joten aikaisemmin kuvassa 3.3 esitetty elementti kertoo miltei testattava elementti näyttää uunin sisäpuolelta katsottuna.

Polttotestin aikana tutkittavan rakenteen uuninpuoleiset tiivisteet syttyvät ensimmäisinä palamaan, jonka jälkeen uuninpuoleiset profiilipuoliskot sekä lasituslistat alkavat sulamaan. Kun profiilipuoliskot ja lasituslistat ovat sulaneet ja valuneet uunin pohjalle, alkavat profiilien täytteet hieman täyteaineesta riippuen taipumaan uuniin päin ja testin lopussa useimmat täytteet murtuvat ja tipahtavat uunin pohjalle kokonaan. Testin loppupuolella myös rakenteessa käytetyt uuninpuoleiset turpoavat tiivisteet palavat niin pahasti, että nekin alkavat hapertua ja murenevat uunin pohjalle.



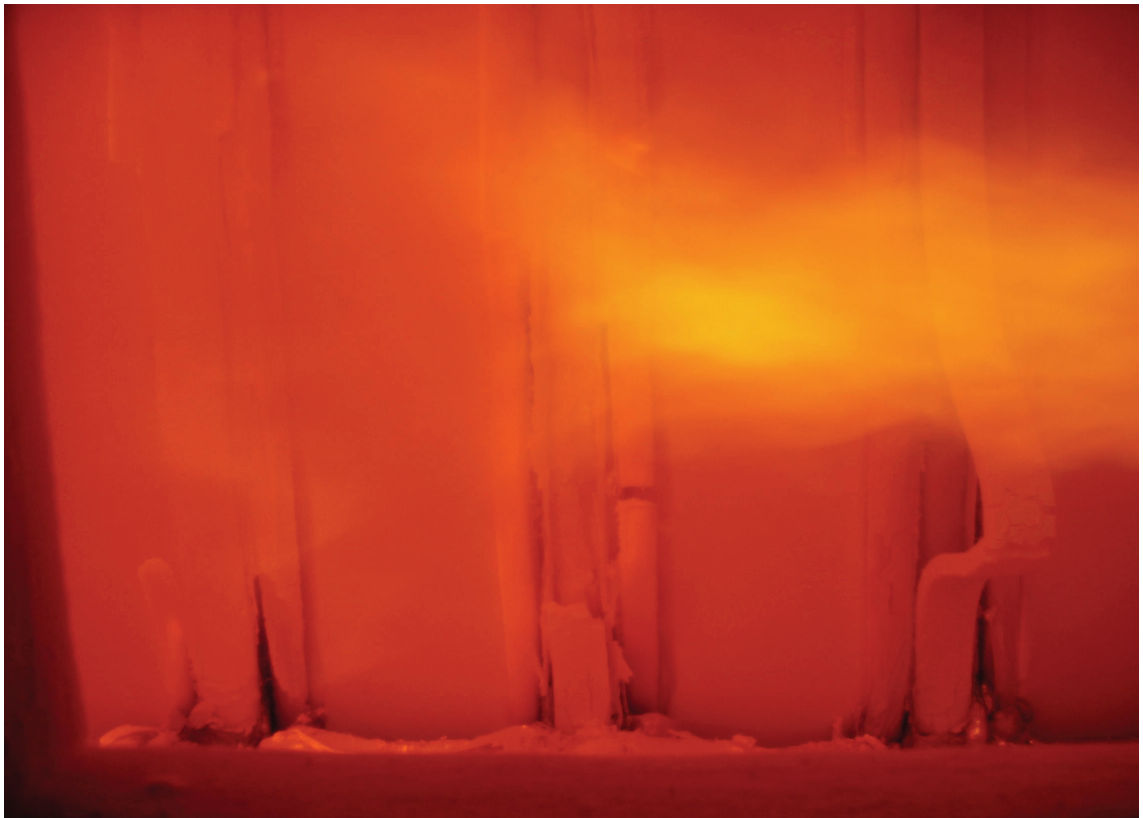
Kuva 4.6. Kuva uunin sisältä, kun testin alusta on kulunut noin 5 minuuttia. Lasitustiivisteet ovat tummuneet, mutta eivät vielä ole syttyneet palamaan.



Kuva 4.7. Kuva uunin sisältä, kun testin alusta on kulunut noin 15 minuuttia. Lasitustiivisteet palavat kunnolla tai osittain palaneet jo loppuun.



Kuva 4.8. Kuva uunin sisältä, kun testin alusta on kulunut noin 30 minuuttia. Profiilien uuninpuoleiset puoliskot ja lasituslistat sulaneet huomattavasti keskustojen kohdalta.



Kuva 4.9. Kuva uunin sisältä, kun testin alusta on kulunut noin 45 minuuttia. Vasemmanpuoleisen ja keskimmäisen testikappaleen täyteaineet ovat tippuneet jo uunin pohjalle sekä oikeanpuoleisen testikappaleen täyteaine on taipunut voimakkaasti.



Kuva 4.10. Kuva uunin sisältä heti testin päättymisen jälkeen, kokonaispoltto aika 68 minuuttia. Uuninpuoleiset profiilienpuoliskot ovat täysin sulaneet, profiilien uuninpuoleiset täytteet ovat tippuneet uunin pohjalle sekä turpoavat tiivisteet profiilien reunoilla ovat osittain vielä paikoillaan, mutta osittain hapertuneet uunin pohjalle.

Liitteen 1 kuvaajia analysoimalla yhdessä testin aikana tehtyjen havaintojen kanssa voidaan rakenteen käyttäytymisestä tulkita seuraavanlaisia asioita. Rakenteen kylmän puolen pintalämpötila pysyy lähes muuttumattomana aina siihen asti, kunnes ensimmäisten viiden minuutin jälkeen testin alusta uuninpuoleiset lasitustiivisteet sytyvät palamaan. Kumitiivisteiden palaminen lämmittää uuninpuoleisia profiilinpuoliskoja ja niiden yhteydessä olevia lasinkiinnikkeitä. Koska rakenteen sisällä olevat täyteaineet ja turpoavat tiivisteet eivät vielä ole ehtineet reagoimaan lämpötilan nousuun, pääsee uunin sisäpuolella muodostuva lämpö siirtymään suhteellisen vapaasti rakennetta pitkin profiilien kylmälle puolelle. Tästä syystä myös profiilien kylmänpuolen pintalämpötilan nousu on testin alussa kaikista nopeinta.

Profiilien kylmän puolen pintalämpötilojen nousu kuitenkin tasaantuu huomattavasti reilun 15 minuutin kohdalla testin alusta. Tähän syynä on täyteaineiden ja turpoavien tiivisteiden palonsuojauskyvyn esiin tuleminen. Noin 20 minuutin kohdalla myös profiilipuoliskoja yhdistävät lämpökatkot ovat osittain sulaneet ja sulaneiden lämpökatkojen paikalle on korkean lämpötilan vaikutuksesta turvonnut eristävä tiivistekerros sekä mahdollisesti turpoavaa täyteainetta, jos sellaista on käytetty profiilien kammi-oissa. Näin ollen profiilien keskustaan syntyy yhtenäinen ja tiivis eristekerros ja tästä syystä myös uunin puolella kehittyvä lämpö pääsee huomommin siirtymään profiilien kylmälle puolelle.

Muutamat liitteen 1 kuvaajasta selkeästi alkupäästään erottuvat käyrät johtuvat testikappaleissa käytettyjen täyteaineiden määrästä sekä testikappaleiden fysikaalisista

ominaisuuksista. Kuvaajan käyrä, jonka pintalämpötilan nousu on alussa muita nopeampaa, johtuu testikappaleessa käytetystä pintakäsittelystä. Testikappaleen pinnat ovat anodisoituja, jolloin uunin sisällä muodostuva lämpö sitoutuu anodisoidun pinnan suuren emissiivisyyden takia herkemmin uuninpuoleiseen profiilipuoliskoon kuin raa'an pinnan tapauksessa. Näin ollen lämpö pääsee siirtymään nopeammin testin alkuvaiheessa profiilin kuumalta puolelta sen kylmälle puoliskolle. Vasta, kun testikappaleen keskelle on täyteaineiden ja turpoavien tiivisteiden ansiosta muodostunut lämpöä eristävä yhtenäinen kerros, alkaa testikappaleen pintalämpötilan nousu rauhoittua. Kuten teoriaosuuden lopussa todettiin, on lämpösäteilyn määrä verrannollinen emissiivisyyden lisäksi lämpötilojen neljänteen potenssiin. Näin ollen pintalämpötilan nousun laantumista selittää myös se, että profiilin kylmän puolen lämpötilan noustua riittävästi, alkaa anodisoitu pinta voimakkaasti säteillä lämpöä ympäristöönsä.

Liitteen 1 kuvaajan tapauksessa, jossa lämpötilannousu on koko testijakson ajan maltillista ja tasaista heti alusta asti johtuu siitä, että kyseisen testikappaleen täyteaineet ovat täyttäneet profiilin jokaiseen kammioon jääneen tyhjän tilan varsin tarkasti. Lisäksi osa täyteaineena olleesta materiaalista oli herkästi lämpötilan vaikutuksesta turpoavaa, joten pienikin kammion lämpötilan kasvu sai täyteaineen turpoamaan ja tilkitsemään rakenteeseen jääneet raot. Täyteaine muutenkin oli tehokas rakenteen jäähdyttäjä, joten kuvaajan lämpötilakäyrän kulmakerroin jäi tästä syystä hyvin pieneksi koko testijakson ajaksi.

Reilun 20 minuutin jälkeen testin alusta katsoen kylmän puolen pintalämpötilan nousu on lähes poikkeuksetta kaikkien testien kohdalla varsin tasaista aina testin loppuun asti. Pintalämpötilannousun kulmakertoimeen vaikuttaa tästä eteenpäin hyvin voimakkaasti täyteaineena käytetyn materiaalin sisältämän kideveden ja muun lämmönvaikutuksesta vapautuvan nesteen määrä. Yksinkertaisesti ilmaistuna, mitä enemmän täytemateriaalissa on korkean lämpötilan vaikutuksesta vapautuvaa ja höyrystyvää nestettä, sen paremmin se pystyy hillitsemään myös pintalämpötilan nousua.

Muutamien täytemateriaalien kohdalla on testien loppuvaiheessa havaittavissa aavistuksenomaista lämpötilan nousun kiihtymistä, joka johtuu täytemateriaalista irtoavan nesteen loppumisesta ja tästä aiheutuvan jäähdytyskyvyn heikkenemisestä. Lisäksi lopun lämpötilan nousun kiihtymiseen vaikuttaa myös uunin puoleisen profiilipuoliskon sisällä olleen täytemateriaalin paikallaan pysyvyys. Kuten kuvasta 4.7 havaittiin, jotkut täytemateriaalit taipuivat ja murenivat uunin pohjalle noin 45 minuutin kohdalla testin alusta. Kun täytemateriaali ei murenemisesta johtuen enää ollut suojaamassa sen taakse jääviä rakenteita, pääsi lämpö paremmin tunkeutumaan syvemmälle profiilissa aiheuttamen kylmän puolen pintalämpötilan nousun kiihtymistä.

Täyteaineiden paikallaan pysymisessä oli paljon eroa eri materiaalien välillä. Kipsilevyjen kohdalla korkean lämpötilan vaikutuksesta aiheutuva kideveden vapautuminen aikaansai perusmassan kutistumista ja tästä aiheutui kipsin halkeilua ja murenemista pieniksi palasiksi. Varsinkin kipsilevyt jotka sisälsivät vähän sideaineita ja levyjen vahvikkeina oli lyhyttä kuitua, kestivät kideveden vapautumista huonosti ja murenevät uunin pohjalle kaikista nopeimmin. Kipsilevyjen tilannetta paransi huomattavasti,

kun levyjen vahvikkeina käytettiin pidempiä kuituja sekä kuituverkkoja. Tällaiset kipsilevyt pitivät muotonsa pidempään ja pysyivät profiilien suojana paremmin lohkeilusta huolimatta.

Kalsiumsilikaattilevyt eivät kutistuneet ja halkeilleet yhtä paljoa testien lopussa, sillä niiden kosteuspitoisuus on paljon pienempi kuin kipsilevyjen ja näin ollen haihtuvaa nesteen määrä oli paljon pienempi. Toisaalta kalsiumsilikaattilevyt menettivät yhtälailla muotonsa ja alkoivat taipua korkean lämpötilan takia, koska kuumuus heikensi levyjä koossa pitäviä kuiturakenteita. Loppujen lopuksi myös kalsiumsilikaattilevyjen rakenne petti ja täytesoirot tippuivat uunin pohjalle hyvin samoihin aikoihin kuin kipsilevytkin polttotestin aikana, joten kalsiumsilikaattilevyillä ei testeissä saatu muodostettua rakenteelle pidempiaikaista suojausta kipsilevyihin verrattuna.

Toinen natriumsilikaattipohjaisista palonsuojalevyistä, jota testeissä käytettiin, oli pääasiassa muodostettu natriumsilikaatista, johon oli lisätty ainoastaan pieni määrä sideaineita ja kuituja levyn rakenteen vahvistamiseksi. Kyseinen palonsuojalevy turposi huomattavasti muodostaen joksikin aikaa rakenteiden suojaksi vaahtomaisen, mutta suuren kuumuuden takia pehmeän kerroksen profiilin pintaan. Vaahtomainen kerros pysyi paikallaan hieman pidemmän aikaa kuin kipsi- ja kalsiumsilikaattilevyt, mutta luhistui kuitenkin ennen testin päättymistä ja valui uunin pohjalle. Näin ollen pelkkä kuituverkoilla vahvistettu natriumsilikaattilevykään ei tarjonnut parasta mahdollista suojaa profiilille.

Sandwich-rakenteiset palonsuojalevyt, joiden välissä oli natriumsilikaattigeeliä levykerrosten yhteen liimaamiseksi ja palonsuojakyvyn lisäämiseksi, pysyivät parhaiten muodossaan polttotestin aikana. Nämä palonsuojalevyt olivat ainoita, jotka pysyivät pakoillaan koko polton ajan, eivätkä ne murtuneet tai tippuneet uunin pohjalle. Kyseisten levyjen paikallaan pysymistä edesauttoi natriumsilikaatin turpoaminen polton aikana, jolloin palonsuojalevy takertui muodostuneen vaahdon avulla profiilinseinämien rippeisiin ja muuhun rakenteeseen kiinni. Varsinaiset kuitulevyt olivat polton jälkeen varsin helposti murenevia, mutta kuitenkin riittävän kestäviä pitämään muotonsa polton rasisuksessa. Natriumsilikaatilla parannelluilla kerroslevyillä mitattiin alhaisimmat profiilien pintalämpötilat ja niiden lämpötilan nousu oli hillittyä ja tasaista suurimman osan aikaa polttojaksosta.

Natriumsilikaatin käytön yhtenä rajoituksena on sen herkkä liukenevuus veteen. Jo riittävän kostea ilma pystyy notkistamaan kovettuneen natriumsilikaatin takaisin geelimäiseen muotoon, joten kosteissa ympäristöissä piilee vaara, että natriumsilikaatti valuu profiilien sisältä heikentäen rakenteen palonkestävyyttä ja normaalikäytössä sotkien rakenteen pinnan tullessaan ulos profiilien sisältä. Myös kipsilevyjen kohdalla on samanlaista ongelmaa, sillä kipsilevyt imevät nestettä varsin herkästi itseensä ja menettävät sen tuloksena osan jäykkyys- ja palonsuojaominaisuuksista. Näin ollen kipsilevyjäkään ei voida käyttää ilman erityisjärjestelyitä kosteissa tiloissa. Yksi tapa parantaa natriumsilikaattilevyjen kosteudenkestoa on esimerkiksi päällystää levyt ohuella alumiinifoliolla, kuten yhden natriumsilikaattilevyn tapauksessa oli meneteltykin. Toisaalta levyjen päällystäminen kasvattaa jo entisestään arvokkaiden natriumsilikaattilevyjen kus-

tannuksia. Kalsiumsilikaattilevyt ovat ainoita, jotka sietävät tietyssä määrin kosteutta ja suoraa kosketusta nesteisiin, joten märissä tiloissa kalsiumsilikaattilevyt ovat helpoin tapa muodostaa kosteutta kestävää palonsuojausta.

Polttotestauksessa yhtenä kokeena yritettiin tehostaa kipsilevyjen ominaisuuksia ja parantaa niiden toimintaa kiinnittämällä kipsilevyjen kapeille sivuille ylimääräisiä turpoavia tiivisteitä. Ylimääräisten tiivisteiden tarkoituksena oli tehokkaammin tiivistää profiilin sisään jääviä rakoja sekä auttaa kipsilevyjä pysymään paremmin paikallaan testin edetessä. Ylimääräisillä tiivisteillä ei kuitenkaan todettu olevan juurikaan vaikutusta testikappaleen pintalämpötiloihin tai rakenteen käyttäytymiseen polttotestissä.

Eri täyteaineita yhdisteltiin samaan testikappaleeseen parhaan kombinaation löytämiseksi. Yhdistelmätestien ja aikaisemmin suoritettujen testien valossa pystyttiin tekemään johtopäätökset, minkälaisia ominaisuuksia profiilien eri kammioihin sijoitetuilta täyteaineilta vaaditaan. Uuninpuoleisen profiilipuoliskon sisään sijoitettavan täyteaineen tärkeimpinä ominaisuuksina havaittiin olevan korkea kosteuspitoisuus sen ominaispainosta sekä täyteaineen rakenteen muodon säilyvyys äärimmäisessä kuumuudessa. Korkean kosteuspitoisuuden avulla mahdollistettiin hyvä jäähdytysvaikutus sekä rakenteen muodon säilyvyydellä riittävä muun profiilin palonsuojaus siinä vaiheessa, kun täyteaineen ympäriltä ovat alumiiniseinämät sulaneet pois. Myös kylmän puolen profiilipuoliskon sisään tulevalta täyteaineelta edellytetään hyvää jäähdytysominaisuutta korkean kosteuspitoisuuden avulla, mutta koska kylmällä puolella profiilipuolisko pitää muotonsa koko testausjakson ajan, on täyteaineen muodon säilyvyys varsin toissijainen ominaisuus. Toisaalta, koska osastoivat rakenteet ovat yleensä luokiteltuja molemmiin puoleista paloa ajatellen, täytyy kummankin profiilipuoliskon täytteiden vastata kaikkia niille yhteisesti asetettuja vaatimuksia.

Profiilipuoliskojen väliin jäävän keskikammion täytteen ehdottomasti tärkein ominaisuus on muodostaa yhtenäinen ja tiivis eristekerros profiilipuoliskojen väliin. Tällä tavalla estetään parhaalla tavalla lämmönsiirtyminen profiilin puoliskojen välillä ja saadaan parannettua sekä rakenteen eristävyyttä että lisäksi tiiviyyttä. Myös keskikammion kosteuspitoisuudesta oli hyötyä, mutta keskikammion täytteen tapauksessa jäähdytysvaikutus voitiin katsoa kuitenkin toissijaiseksi ominaisuudeksi. Keskikammion täytteen jäykkyydestä on lisäksi apua, sillä jäykän täytteen avulla voidaan tukea koko elementin jäykkyyttä. Elementin jäykkyyden parantamisella ennaltaehkäistään mahdollisten rakojen ja aukkojen syntymistä, jotka ovat huomattava uhka elementin taipuessa polttotestauksen aikana.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä luvussa arvioidaan kuinka työn alussa asetetun ongelman ratkaisussa onnistuttiin. Lisäksi luvussa nostetaan esiin asioita, jotka työn kohdalla onnistuivat erityisen hyvin ja toisaalta taas asioita, jotka olisivat kaivanneet syvempää paneutumista ja tutkimusta. Jäljempänä mainittuihin asioihin voidaankin keskittyä tulevien tuotekehitysprojektien parissa tarkemmin nyt, kun tietty pohjatyö ja selvitykset tulivat tämän projektin osalta saatettua alulle.

Lopuksi käsitellään vielä työn pohjalta saatujen tulosten jatkohyödyntämistä ja soveltamista työn kohteena olleen alumiinisen palo-ovijärjestelmän tyyppihyväksyntärupeaman yhteydessä. Varsinainen tyyppihyväksyntätestaus ja niiden valmistelut ovat pitkä ja aikaa vievä prosessi, joten niiden valmistumista ei työn pitkittymisen takia voitu jäädä odottamaan. Työn aikana ehdittiin kuitenkin suorittaa yksi täysikokoinen poltto-testi, jossa hyödynnettiin työssä kerättyä tietoa, joten varmistus työn tulosten pätevyydelle saatiin muodostettua.

Viimeisenä kohtana luodaan työssä katsaus tulevaisuuteen ja pohdiskellaan kuinka palo-ovijärjestelmää voitaisiin kehittää vielä entisestään. Tulevaisuuden kehityskohteissa tarkastellaan niin täytemateriaalien kuin tarvikkeidenkin näkökulmasta eri mahdollisuuksia, joita voitaisiin järjestelmän yhteydessä hyödyntää, mutta myös muita työssä käytettyjä keinoja tulevaisuuden varalle. Paloturvallisuusvaatimusten tiukentumassa ja menetelmien kehittyessä on hyvä olla jo valmiiksi mietittynä, mitä järjestelmälle voidaan tehdä tämän työn annin jälkeen, sillä kyseisen järjestelmän viimeiseksi tuotekehitysprojektiksi tämä työ tuskin jää.

5.1 Polttouunin toiminta ja soveltuvuus testaukseen

Työssä rakennettu pieni polttouuni oli äärimmäisen olennainen osa työssä suoritettua testausta. Saadut tulokset olisi ollut mahdollista kerätä myös perinteisemmällä tavalla tekemällä standardin mukaisia täysikokoisia polttotestejä, mutta tällä tavalla vastaavan tietomäärän kerääminen olisi kestänyt huomattavasti kauemmin ja kokonaiskustannukset olisivat olleet täysin omalla tuhatluvullaan. Lisäksi täysikokoisista testeistä on vaikeampaa saada tietoutta tehtyjen yksittäisten muutosten vaikutuksista, jotka pienen polttouunin kohdalla tulivat varsin selkeästi esille testien tuloksista.

Oman haasteensa pienen polttouunin rakentamiseen asetti vertailukohteen täydellinen puuttuminen. Vastaavanlaista pientä polttouunia ei työn parissa toimineiden henkilöiden tietouteen ole vielä tähän mennessäkään tullut, joten polttouunin suunnittelu ja rakennus päästiin aloittamaan tyhjältä pöydältä. Tähän suhteutettuna työssä rakennettua polttouunia ja sen toimintaa voidaan pitää vähintäänkin onnistuneena, sillä uunin

avulla saatiin tehtyä onnistuneita ja luotettavia testejä, myös turvallisuuden kannalta tarkasteltuna. Lisäksi uunin takaosassa olevan seurantaikkunan kautta pystyttiin tekemään huomattavasti tarkempia havaintoja uunin sisällä tapahtuvista asioista kuin missään aikaisempien tuotekehitysprojektien testeissä. Vastaavanlaista seurantaikkunaa ei standardiuuneissa ole, eikä näin ollen työssä saatuja havaintoja olisi pystytty tekemään täysikokoisissa polttotesteissä yhtä tarkasti kuin tämän työn perusteella.

Kuitenkin yksi testien kattavuutta rajoittava ominaisuus on polttouunin pieni koko, joka estää elementtien taipumisen tarkastelun lämpölaajenemisen vaikutuksesta. Elementin taipuminen on etenkin tiiviyn suhteen yksi kriittisimmistä tekijöistä luokitustestissä. Pienessä polttouunissa käytettyjen testikappaleiden taipuminen on näin pienessä mittakaavassa lähes olematonta, joten varsinaisia tiiviyskokeita rakojen ja aukkojen muodostumisen suhteen ei pienellä polttouunilla pystytä simuloimaan.

Toki, koska rakennettu polttouuni oli ensimmäinen laatuaan, myös muutamia kehityskohteita sen toiminnassa löytyi parannettavaksi tulevaisuudessa. Ensinnäkin kaasun paineen aleneminen aiheutti ongelmia muutaman testin kohdalla. Tästä syystä joitakin testikertoja jouduttiin lopettamaan ennen aikaisesta kesken, koska kaasupullon painetaso tippui niin alhaiseksi, että testien loppupuolella tarvittavaa suurta lämpötehoa ei pystytty muodostamaan. Testeissä käytettyjä 11 kg:n kaasupulloja ei varsinaisesti ole tarkoitettu korkeapainejärjestelmien polttoainelähteiksi, mutta niiden käyttöä puolsi niiden hyvä sekä helppo saatavuus ja vaihdettavuus.

Yksi ratkaisu tähän ongelmaan olisi käyttää vaihtoehtoisesti isompaa 33 kg:n kaasupulloa, jolloin paineet riittäisivät pidemmäksi aikaa, mutta kyseisten kaasupullojen saatavuus ja lisääntyneen painon myötä tuleva siirtelyn ongelmallisuus kuitenkin vastustavat ratkaisua. Toinen ratkaisu olisi liittää toinen 11 kg:n kaasupullo omilla paineenalennus- ja letkurikkoventtiileillä polttimen yhteyteen, joka olisi helppo toteuttaa yksinkertaisella T-liitoskappaleella. Lisäksi nestekaasuasetus sallii kahden polttoainelähteen asentamisen yhdelle polttimelle ilman kaasuasentajan lupia, kunhan liitettävät osat olisivat valmiiksi rakennettuja, joten tällainen ratkaisu olisi helppo toteuttaa muuttaman lisäosan hankinnalla.

Toinen hyvä kehityskohde polttouunin kohdalla on uunin sisäeristeiden parantaminen. Nykyisessä muodossaan uunin sisäeristeenä käytettäviä kivivillalevyjä joudutaan vaihtamaan noin kolmen tai neljän polton jälkeen uusiin, jotta uunin eristyskyky olisi riittävää ja näin ollen säästettäisiin poltinta ja kaasua sekä helpotettaisiin uunin sisälämpötilan säätämistä. Uunin sisälle voisi harkita oman palonkestävästä pellistä tehdyn metallivaipan valmistamista, joka uunin rungon ja metallivaipan välistä eristettäisiin nykyisinkin käytössä olevalla villalla. Toinen vaihtoehto voisi olla uunin sisäosan vuoraaminen tiilillä tai muilla tähän tarkoitukseen sopivilla harkoilla, jolloin saataisiin muodostettua entistä kestävämpi eristekerros.

Polttouunin sisälämpötilan säätö toteutettiin, kuten aikaisemmin polttouunin rakennusvaiheessa todettiin, täysin mekaanisesti. Koska uunin sisälämpötila reagoi varsin herkästi tehtyihin säätötoimenpiteisiin, aiheutti tämä lisäksi sen, että uunin sisälämpötilaa tuli jatkuvasti säätää läpi koko testijakson. Sisälämpötilan säätö oli kuitenkin suh-

teellisen yksinkertaista ja sisälämpötilaa pystyi säätämään hyvällä tarkkuudella haluttuun standardikäyrään nähden. Näin ollen standardeissa annettujen lämpötilatoleranssien sisällä oli helppo pysyä. Ainoa haittapuoli säädössä oli sen työllistävä tekijä, jolloin testien analysoinnin kannalta äärimmäisen tärkeiden havaintojen teko testikappaleiden käyttäytymisestä häiriintyi. Tästä syystä testejä tehdessä olisi hyvä olla vähintään kaksi testaamiseen perehtynyttä henkilöä. Lisäksi jo pelkästään yleisen turvallisuuden kannalta kaksi testaushenkilöä on suorastaan minimivaatimus, jotta mahdolliset vaaratilanteet pystytään havaitsemaan paremmin ja niihin reagoiminen on nopeampaa.

Työn tuloksia käsiteltäessä jouduttiin ottamaan huomioon uunin sisälämpötilan mittauksessa käytetyn anturin sijoittelu uunin sisällä. Kyseinen anturi sijoitettiin polttimen kanssa samalle seinällä uunin runkoa, testattavan elementin puoleiseen alanurkkaan kuitenkin niin, etteivät testikappaleissa tapahtuvat muutokset vaikuttaisi anturin näyttämään. Toisin sanoen anturi oli sijoitettuna uunin ”viileimpään” kohtaan, joten kauimpana polttimesta olleen testikappaleen testauslämpötila oli hieman korkeampi kuin lähimpänä poltinta olleella testikappaleella. Epätasaisen lämpötilajakauman takia testien tuloksia jouduttiin skaalaamaan toisiinsa nähden, jotta varsinaiset vertailtavat arvot saatiin muodostettua. Tulevaisuudessa uunin toimintaa voisikin kehittää asentamalla uunin sisälle toinen anturi uunin sisäosan ”kuumalle” puolelle ja säätää testissä uunin sisälämpötilaa näiden kahden anturin näyttämien keskiarvon mukaisesti. Tällöin uunin sisälämpötilan vaihtelut vastaisivat paremmin standardiuunin lämpötilavaihteluita, sillä myös standardiuunissa lämpötilat vaihtelevat lämmön epätasaisen jakaantumisen johdosta jopa toistakymmentä astetta suuntaan tai toiseen.

Pienessä polttouunissa käytettyjen testikappaleiden täyteaineet pysyivät standardiuunissa testattavaan elementtiin nähden hieman paremmin paikoillaan, sillä osa pienessä uunissa käytetyistä testikappaleista ulottui uunin ulkopuolelle, jonne kuumuus ei päässyt vaikuttamaan. Tätä eroavaisuutta kompensoitiin katkaisemalla täytteet sopivasta kohdasta useaan osaan, jotta ne tippuisivat uunin pohjalle vastaavalla tavalla kuin täysikokoisessa elementissä olevat täytteet profiilipuoliskojen seinämien sullettua täytteiden edestä. Toisaalta huomattiin kyseisen ilmiön vaikuttavan kohtuullisen vähän saatuihin tuloksiin, joten tämän asian suhteen ei pienen polttouunin tapauksessa tarvitse jatkossa muutoksia.

5.2 Työn tulosten käsittely ja jatkosovellukset

Työssä suoritetun laskentamallin kohdalla olisi varmasti suurin tilaisuus parantaa tulosten tarkkuutta ja laskennasta saatavaa hyötyä. Tämän työn kohdalla tyydyttiin kuitenkin vain tekemään pintaraapaisu kyseiseen aiheeseen, sillä kunnollisen laskentamallin muodostus veisi oman aikansa ja voisi hyvin olla täysin oma opinnäytetyön aihe jo pelkästään. Tästä syystä laskentaa käytettiin vain analyysien tukemiseksi ja päätelmien vahvistamiseksi.

Vaikka kaikista parhaat tulokset käytännön testauksessa saatiinkin käyttämällä natriumsilikaattipohjaisia palonsuojalevyjä, ei niitä kuitenkaan haluttu lähteä hyödyn-

tämään järjestelmän täyteinä niiden kalliin hinnan ja siitä aiheutuvan rakenteen kokonaiskustannusten suuren kasvun johdosta. Näin ollen työn aikatauluun sisällytettyyn täysikokoiseen polttotestiin valittiin lupaavia tuloksia antanut palokipsilevy profiilien täytteeksi. Kyseisen palokipsilevyn valinnan puolesta puhui myös ne asiat, että sitä oli huomattavasti paremmin saatavilla, sen hankintahinta on huomattavasti edullisempaa ja lisäksi järjestelmän valmistusohjeisiin ei tarvitsisi tehdä suuriakaan muutoksia vaihdettaessa käyttämään tätä materiaalia profiilitäytteenä.

Valittu kipsilevy eroaa työn kohteena olevan palo-ovijärjestelmän aikaisempaan täyteaineeseen siten, että kipsilevyn perusmassaan sekoitetut kuidut ovat pidempiä ja niitä on enemmän kuin aiemmin käytetyssä. Lisäksi kuiduista on punottu kipsilevyn pintakerrokseen kuituverkot, joilla parannetaan kipsilevyn jäykkyyttä. Täyteaineen kasvaneen jäykkyyden ansiosta, kipsilevysoirot pysyivät yhtenäisemmässä muodossa ja paremmin paikoillaan polttotestin aikana, jonka ansiosta rakenteen pintalämpötilat saatiin pidettyä sallituissa rajoissa. Kuvassa 5.1 on esitetty EI-luokituksen vaatimukset läpäisseen täysikokoisen elementin kuva polttotestin lopusta, kun aikaa testin alusta on kulunut pidennetyn polttoajan vaatimat 68 minuuttia.



Kuva 5.1. Työn tulosten pohjalta valmistetun täysikokoisen elementin kuva 68 minuutin kohdalta testin alusta.

Työn tarkoituksena oli kehittää palo-ovijärjestelmän eristävyys lisäksi myös sen rakenteen tiiviyyttä. Onnistunut täysikokoinen polttotesti kuitenkin osoitti, että jäykempien täytteiden ansiosta sekä alentuneen kylmän puolen profiilipuoliskon lämpötilan takia ei rakenteessa ilmennyt tiiviysongelmia. Rakenteen paremman jäykkyyden ansiosta ei elementin taipumisesta muodostunut rakoja tai aukkoja, jotka olisivat uhanneet rakenteen tiiviyyttä. Edellä mainituista asioista johtuen rakenteen tiiviyyden parantamiselle ei nähty tarvetta, sillä rakenteen eristävyysominaisuuksien kehitys edesauttoi myös rakenteen tiiviyyttä.

5.3 Tulevaisuuden kehityskohteet

Työssä suoritettun tiedonhaulla saatiin kerätyksi nykyhetken tilanne markkinoilla olevien palonsuojatuotteiden tarjonnasta. Materiaalit kuitenkin kehittyvät jatkuvasti ja uusille ratkaisuille on kokoajan kysyntää alati tiukentuvien vaatimusten myötä. Tästä syystä tulevien tuotekehitysprojektien aluksi onkin hyvä päivittää aina sen hetkinen tilanne palonsuojatuotteiden kohdalla, jotta viimeisin tietämys saadaan käytettyä hyväksi. Vaikka kehittyneitä palonsuojatuotteita ei saataisikaan suoraan siirrettyä järjestelmän käyttöön niiden ilmestyessä, sillä tällä hetkellä kyseiset muutokset rakenteessa vaativat oman tyyppihyväksyntätestinsä, on kuitenkin hyvä olla tietoinen markkinoilla tapahtuvista muutoksista, jotta järjestelmän kilpailukykyyn voitaisiin tarvittaessa tehdä mahdollisimman nopeita muutoksia.

Varmasti vielä pitkään palonsuojauspuolella joudutaan tarkemmat testit suorittamaan käytännön avulla juuri laskennan hankaluudesta johtuen. Kuitenkin huolella muodostetusta laskentamallista voisi toisaalta olla suunnatonta apua turhien ratkaisumallien karsinnassa ja tällä tavoin pystyttäisiin keskittymään vain olennaisiin asioihin ja vähennettäisiin huomattavasti testauksen tarvetta. Laskentamallin etuna olisi myös sen monikäyttöisyys, kunhan vain sen parametrisointi toteutettaisiin kunnolla, sekä mallin muunneltavuus huomattavasti nopeammin kuin käytännön testien kohdalla. Lämmönsiirto- sekä virtauslaskentaohjelmien kehittyessä polttotapahtuman mallinnus ja simulointi voisi hyvinkin olla realistinen vaihtoehto käytännön testaukselle etenkin suunnittelun alkuvaiheessa.

Palonsuojalevyjen kohdalla tulee varmasti tapahtumaan kehitystä vuosien kuluessa. Kipsilevyt ovat hintansa ja perusominaisuuksiensa puolesta hyvin kilpailukykyisiä jo tällä hetkellä. Niiden kohdalla kehitys tulee painottumaan levyjen kestävyys, kuten lujuuden ja jäykkyyden parantamisessa, sekä osittain varmasti myös jäähdytysominaisuuksien valossa. Muutama vuosi sitten tehtiin Kreikassa paikallisen teknillisen yliopiston toimesta tutkimus, jossa kipsilevyn perusmassan sekaan oli sekoitettu parfiinipohjaista PCM-ainetta.

PCM (Phase Change Material) eli faasimuunnoksen avulla olomuotoansa vaihtava materiaali toimi vastaavalla tavalla testeissä kuin kipsilevyyn kemiallisesti sitoutunut vesi. Näin ollen PCM:n avulla pystyttiin kasvattamaan lämpötilan nousun johdosta vapautuvan nesteen määrää, jolloin levyn jäähdytysominaisuudet paranivat tavalliseen kipsilevyyn verrattuna. PCM:n eduksi havaittiin myös se, että sen faasimuutoslämpötila oli hieman korkeampi kuin kipsilevyn kideveden vapautumiseen tarvittava lämpötila. Tästä syystä saatiin jäähdytysominaisuuksien parantumisen lisäksi pidempiaikainen jäähdytysvaikutus PCM-kipsilevyllä. PCM-kipsilevyjä ei vielä ole tavattu kaupallisessa muodossa, mutta ne mahdollisesti voisivat asettua tavallisten kipsilevyjen ja natriumsilikaattipohjaisten palonsuojalevyjen välimaastoon sekä ominaisuuksien että hintansa puolesta.

Palonsuojatuotteiden kohdalla työssä ei tarvinnut keskittyä paljoakaan rakenteen tiiviiden parantamiseen. Jos tulevaisuudessa rakenteen tiiviiden kanssa tulee ongelmia,

voidaan siihen puuttua muutamalla eri tavalla. Ensinnäkin natriumsilikaattitiivistien avulla pystytään tarjoamaan sekä enemmän turpoava että paremmin palolta eristävä vaihtoehto nykyisten turpoavien tiivistien tilalle. Natriumsilikaatista valmistetut tiivistet käyttäytyvät hyvin vastaavalla tavalla kuin natriumsilikaattipalonsuojalevytkin, mutta sillä erotuksella, että tiivistemateriaali on valmistettu taipuisaksi ja nauhamaiseen muotoon. Näin ollen pelkkiä turpoavia tiivisteitä vaihtamalla voitaisiin pystyä ratkaisemaan pienien rakojen ja aukkojen muodostuminen rakenteessa.

Jos ongelmana on kuitenkin esimerkiksi koko oven paikallaan pysyvyys, johon pelkkien tiivistien avulla ei voida vaikuttaa, voidaan apuun ottaa järeämpiä keinoja. Yhtenä vaihtoehtona ovien ja avattavien ikkunoiden kulkuaukkoihin voitaisiin kehittää niin sanottuja lämpösulakevarmistustappeja, jotka lämmönvaikutuksesta laukeaisivat ja toisivat lisäksi kiinnityskohtia rakenteeseen. Tällä tavoin voitaisiin mekaanisesti parantaa ovien ja avattavien ikkunoiden paikallaan pysyvyyttä. Sähköisesti ohjattavien ovien kohdalla olisi mahdollisuus käyttää myös sähköllä toimivia varmistustappeja, jotka telkeytyisivät samaan aikaan ja samalla ohjauksella kuin sähkömekaaniset lukkorungotkin tulipalon syttyessä.

Vaikka tämän työn yhteydessä ei lasinkiinnikkeitä saatu kehitettyä, ei se kuitenkaan tarkoita sitä, että niiden kehitystyötä kannattaisi kokonaan unohtaa. Lasinkiinnikkeet ovat nykymuodossaan erittäin hyvin toimivia ja helppoja asentaa, mutta kuten lämmönsiirtolaskujen tuloksista voitiin tulkita, ovat ne myös erittäin tärkeä kehityksen kohde. Suurin osa lämpövirrasta profiilin syvyyssuunnassa kulkee nimenomaan lasinkiinnikkeiden kautta, joten tulevaisuudessa voitaisiinkin keskittyä enemmän lasinkiinnikkeiden materiaalin, kokonaismäärän ja muodon kehittämiseen kuin niiden moduloitavuuteen ja tuotekirjon vähentämiseen.

Nykyhetkellä osastoivissa ovissa on yleisin vaadittu paloluokka EI30. Vain harvoissa tilanteissa joudutaan käyttämään EI60 luokituksen saanutta järjestelmää, joten määrällisesti kyseisiä ovia menee vuosittain vain marginaalisesti. Tämä seikka ei kuitenkaan vähennä EI60 luokituksen saaneen oven painoarvoa ja merkittävyyttä, sillä sen avulla tuetaan muiden järjestelmien menekkiä huomattavasti. Tämä lausunto perustuu siihen, että on turvallisempaa ja ulkonäöllisesti parempi vaihtoehto toteuttaa rakennuksen kaikki rakennusjärjestelmät, saman valmistajan tuotteilla. Näin ollen lähestulkoon kaikki liittymäkohdat eri järjestelmien välillä ovat valmiiksi mietittyjä ja lopputuloksesta saadaan muodostettua siisti ja yhteneväisen näköinen rakenne.

Tulevaisuudessa on lisäksi mahdollista, että osastoivien järjestelmien palonkestävyysaika joudutaan nostamaan. Vaadittavan palonkeston kasvattaminen voi tulla merkitykselliseksi, jos pelastustoiminnan aloittamiseen kuluva aika tulevaisuudessa pitenee. Tämä voi ilmentyä esimerkiksi silloin, jos rakennuksia aletaan rakentaa yhä syrjäisemmille seuduille tai pelastuslaitoksen toiminnan tehostamisen myötä välimatkat eri kohteiden välillä pitenevät. Lopuksi voidaankin siis sanoa, että EI60 luokiteltujen järjestelmien käytettävyys ja merkittävyys tulee jatkossa todennäköisemmin kasvamaan kuin pientymään.

LÄHTEET

- [1] E1 Suomen Rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Helsinki 2011, Ympäristöministeriö. 37 s. + liitt. 6 s
- [2] Wikipedia, hakusana: rakentamismääräyskokoelma, fi.wikipedia.org/wiki/Suomen_rakentamismääräyskokoelma, Viitattu 5.2.2012
- [3] SFS-EN 13501-2 + A1. Fire classification of construction products and building elements. Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. Helsinki 2010, Suomen standardisoimisliitto. 1+80 s.
- [4] FprEN 1363-1. Fire resistance tests. Part 1: General requirements. Brussels 2011, European committee for standardization. 51 p.
- [5] SFS-EN 1634-1. Fire resistance and smoke control tests for door, shutter and openable window assemblies and elements of building hardware. Part 1: Fire resistance tests for doors, shutters and openable windows. Helsinki 2008, Suomen standardisoimisliitto. 1+74 s.
- [6] SFS-EN 14600. Palonkestävät ja/tai savutiiviit ovat ja ikkunat. Vaatimukset ja luokitus. Helsinki 2005, Suomen standardisoimisliitto. 1+26 s.
- [7] Nokeval, lämpötilan mittaus termoelementeillä, http://www.nokeval.com/pages.php?page_id=12&subgroup_id=2&mid=10&language=finnish, Viitattu 8.4.2012
- [8] prEN 15269-5. Extended application of test results for fire resistance and/or smoke control for door, shutter and openable window assemblies, including their elements of building hardware. Part 5: Fire resistance of hinged and pivoted metal framed glazed doorsets and openable windows. Brussels 2012, European committee for standardization. 112 p.
- [9] Kreith, F., Manglik, R.M., Bohn, M.S. 2003. Principles of heat transfer. Seventh edition, SI. Stamford, Cengage learning. 784 p.
- [10] Ympäristöopas 95. Rakennustuotteiden CE-merkintä rakennustuotedirektiivin mukaisesti. Helsinki 2004, Ympäristöministeriö. 36 s.
- [11] Rakennusteollisuus ry, CE-merkintä, <http://www.rakennusteollisuus.fi/Tuoteteollisuus/Määräykset+ja+standardisointi/CE-merkintä>, Viitattu 14.6.2012

- [12] Poutanen, U. CE-merkittyjen rakennustuotteiden kelpoisuus ja käyttö rakennuksissa. Hämeenlinna 2012. Hämeen ammattikorkeakoulu, Rakentamisen koulutusohjelma. 44 s. + liitt. 60 s.
- [13] Käytä nestekaasua oikein opas. 2010. Helsinki, Turvatekniikan keskus. 16 s.
- [14] Wikipedia, hakusanat: propaani & butaani. fi.wikipedia.org/wiki/propaani, fi.wikipedia.org/wiki/butaani, Viitattu 5.2.2012
- [15] Työterveyslaitos, OVA-ohjeet: nestekaasu, www.ttl.fi/ova/nestek.html, Viitattu 2.3.2012
- [16] Wilhtom Engineering, nestekaasulla toimivat teollisuuspolttimet ja tarvikkeet, <http://www.wilhtom.fi/>, Viitattu 15.2.2012
- [17] Nestekaasuasetus 26.7.1993/711.

LIITE 1.

